

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Departamento de Engenharia Civil

**Avaliação do impacto das pontes térmicas no desempenho  
térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL – análise  
experimental**

João Pedro da Silva Pechincha

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da  
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau Mestre em  
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Orientador: Professor Doutor Daniel Aelenei

2011

## **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Daniel Aelenei, orientador desta dissertação, pelo apoio, pelos conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade e pelas ideias sugeridas ao longo destes meses.

À minha irmã, Catarina, e aos meus pais, Rosa e Flamínio, por me terem dado a oportunidade de tirar um curso superior, por terem sempre acreditado em mim e apoiado em todos os momentos deste longo caminho.

Um agradecimento muito especial à Luísa Brasil, uma das pessoas mais importantes da minha vida, por toda a força, ânimo e motivação que me deu ao longo da elaboração deste trabalho e por ter sempre acreditado em mim quando as coisas não corriam bem.

A todos os meus amigos que de uma maneira ou de outra ajudaram na conclusão deste trabalho.



## Resumo

A energia é uma das principais causas dos problemas ambientais e económicos das sociedades actuais. É um recurso cada vez escasso e, conseqüentemente, mais caro. Nos últimos anos tem sido necessário procurar soluções sustentáveis e implementar medidas que minimizem o consumo de energia. O sector dos edifícios é responsável por cerca de 30% dos consumos energéticos em Portugal, por isso é fundamental que eles possam contribuir da melhor forma para a eficiência energética. As principais perdas energéticas nos edifícios ocorrem ao nível das envolventes exteriores, onde as zonas de pontes térmicas são responsáveis por uma parcela importante nos gastos energéticos. O problema das pontes térmicas não é só energético, podem surgir também alguns problemas de conforto térmico ou, até mesmo, de salubridade.

O objectivo deste trabalho é fazer uma análise experimental de alguns locais dos edifícios do Campus da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, recorrendo a uma câmara termográfica. A análise permite observar os locais onde a temperatura superficial interior é menor e consegue-se verificar se esses locais correm o risco de desenvolvimento de bolores, através da comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental e o teórico. Por outro lado, também é possível verificar se há risco de desenvolvimento de bolores utilizando os coeficientes de transmissão térmica máximos. Neste caso, varia-se a temperatura ambiente exterior e a humidade relativa interior até valores aceitáveis, possibilitando o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica máximos abaixo dos quais não existe risco de desenvolvimento de bolores.

A análise permitiu concluir que, tal como esperado, os edifícios mais antigos correm maior risco de desenvolvimento de bolores e têm maior diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente interior.

Palavras-chave: análise termográfica, pontes térmicas, factor de temperatura superficial, desenvolvimento de bolores



## **Abstract**

Energy is a major cause of environmental and economic problems of today's society. It is an increasingly scarce resource and therefore more expensive. In recent years it has been necessary to find sustainable solutions and implement measures to minimize energy consumption. The building sector accounts for about 30% of the energy consumption in Portugal, so it's essential that they contribute to energy efficiency. The main energy loss in buildings occurs at external envelope where the thermal bridges are responsible for a significant portion of energy expenditure. The problem of thermal bridges is not only energetic, problems may also arise in thermal comfort or even public health.

The goal of this work is developed an experimental analyzes on some of the buildings located on campus of the Faculty of Science and Technology of the Universidade Nova de Lisboa, using a thermal imager. This analysis allows us to see the areas where the interior surface temperature is lower, verifying if these places are at risk of mould growth, by comparing the experimental minimum temperature factor at the internal surface to the theoretical value. On the other hand it is also possible to verify if there is any risk of mould growth using the maximum thermal transmittance coefficients. In this case, the exterior temperature and the interior relative humidity values are made to vary allowing to calculate the maximum thermal transmittance coefficients to which it is possible without being at risk of mould growth.

The analysis concluded that, as expected, the older buildings have a greater risk of mould growth and have a higher temperature difference between the surface and interior environment.

**Keywords:** thermographic analysis, thermal bridges, temperature factor at the internal surface, mould growth



## Índice

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	III
Abstract.....	V
Índice .....	VII
Índice de Figuras .....	IX
Índice de Quadros .....	XI
Simbologia e Abreviaturas .....	XIII
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objectivo.....	3
1.3 Plano de Trabalho .....	4
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS .....	5
2.1 Estado do Conhecimento .....	5
2.1.1 Os estudos das pontes térmicas em Portugal .....	7
2.2 Exigências de conforto térmico .....	11
2.2.1 Parâmetros que influenciam o conforto térmico.....	13
2.3 Mecanismos de Transmissão Térmica .....	14
2.4 Balanço Energético dos Edifícios .....	20
2.4.1 Inércia Térmica.....	20
2.4.2 Coeficiente de Transmissão Térmica, U.....	22
2.4.3 Factor de Temperatura Superficial .....	23
2.5 Pontes Térmicas no campo da Engenharia Civil .....	25
2.5.1 A noção de ponte térmica .....	26
2.5.2 A importância das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios .....	28
2.5.3 Coeficiente de Transmissão Térmica Linear, $\psi$ .....	29
2.5.4 As perdas de energia devido às pontes térmicas.....	30
2.5.5 Anomalias associadas às pontes térmicas.....	31



2.6	Legislação.....	35
2.6.1	Directivas Europeias .....	36
2.6.2	Os novos Decretos-Lei.....	38
2.6.3	Regulamentação em alguns países europeus – tratamento das pontes térmicas	42
2.6.4	Normas Europeias .....	50
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	51
3.1	Breve história da FCT-UNL.....	51
3.1.1	Evolução do Campus da FCT-UNL.....	51
3.2	Termografia no campo da Engenharia Civil .....	52
3.2.1	Os raios infravermelhos .....	52
3.2.2	A termografia por infravermelhos e o equipamento de medição.....	53
3.2.3	Aplicações da termografia nos edifícios .....	55
3.3	Descrição da Análise .....	57
3.4	Metodologia de Trabalho .....	58
4	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	59
4.1	Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “experimental”.....	75
4.2	Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “teórico 1” .....	75
4.3	Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “teórico 2” .....	79
4.4	Coeficiente de transmissão térmica máximo para as zonas correntes da envolvente	82
4.4.1	Cálculo dos coeficientes de transmissão térmica reais .....	88
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	91
5.1	Principais conclusões .....	91
5.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	ANEXO 1 – Diagrama Psicrométrico [23] .....	99
	ANEXO 2 – Restantes fotos não tratadas .....	101
	ANEXO 3 – Quadros para cálculo do $U_{\text{máx}}$ .....	105

## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Distribuição dos consumos energéticos em Portugal 2007 [fonte: DGEG] .....	1
Figura 2.1 - Os primeiros estudos sobre pontes térmicas [6] .....	8
Figura 2.2 - Classes de Higrometria segundo a EN ISO 13788 .....	10
Figura 2.3 - Condições de conforto térmico em gabinetes ou locais de trabalho [11] .....	11
Figura 2.4 - Condições de conforto térmico em salas de aula [11] .....	12
Figura 2.5 - Mecanismos de transmissão térmica.....	15
Figura 2.6 - Comparação entre Inércia Térmica forte e fraca [17].....	21
Figura 2.7 - Fluxo de calor unidireccional [43].....	25
Figura 2.8 - Fluxo de calor bidireccional devido à ponte térmica [43] .....	25
Figura 2.9 - Ponte térmica linear e respectivas linhas do fluxo de calor [adaptado 21].....	26
Figura 2.10 - Ponte térmica linear e linhas do fluxo de calor concentradas [adaptado 21].....	27
Figura 2.11 - Heterogeneidade inserida na envolvente .....	28
Figura 2.12 - Exemplo de envolvente exterior com várias zonas de pontes térmicas [20] .....	30
Figura 2.13 - Isolamento térmico pelo exterior (não há condensações) [43] .....	31
Figura 2.14 - Isolamento térmico pelo interior (há condensações) [43].....	32
Figura 2.15 - Acumulação de microrganismos no Edifício VII da FCT/UNL.....	33
Figura 2.16 - Desenvolvimento de bolores [24] .....	34
Figura 2.17 - As acções dos países europeus relativamente às pontes térmicas [30].....	49
Figura 3.1 - Espectro electromagnético [39] .....	53
Figura 3.2 - Curva de Planck .....	54
Figura 3.3 - Várias aplicações da termografia por infravermelhos .....	54
Figura 3.4 - Câmara termográfica “ThermaCAM B4” da FLIR Systems .....	55
Figura 3.5 - Aplicações da termografia por infravermelhos nos edifícios .....	56
Figura 4.1 - Planta da FCT-UNL com a identificação dos locais analisados .....	59
Figura 4.2 - Planta do edifício VII, localização da análise 1 .....	60
Figura 4.3 - (a) Imagem térmica IR_223 da fachada Sul; (b) Imagem visual .....	60
Figura 4.4 - (a) Imagem térmica IR_227 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual .....	61
Figura 4.5 - (a) Imagem térmica IR_228 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual .....	61
Figura 4.6 - Planta do edifício IV, localização da análise 2 .....	62

Figura 4.7 - (a) Imagem térmica IR_235 do canto Nordeste; (b) Imagem visual.....	63
Figura 4.8 - (a) Imagem térmica IR_236 do canto Sudeste; (b) Imagem visual.....	63
Figura 4.9 - (a) Imagem térmica IR_237 da fachada Este; (b) Imagem visual.....	63
Figura 4.10 - (a) Imagem térmica IR_238 da fachada Este; (b) Imagem visual.....	64
Figura 4.11 - (a) Imagem térmica IR_243 da fachada Este; (b) Imagem visual.....	64
Figura 4.12 - (a) Imagem térmica IR_244 da fachada Este; (b) Imagem visual.....	65
Figura 4.13 - Planta do edifício IV, localização da análise 3.....	65
Figura 4.14 - (a) Imagem térmica IR_229 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual.....	66
Figura 4.15 - (a) Imagem térmica do canto Noroeste; (b) Imagem visual.....	67
Figura 4.16 - (a) Imagem térmica IR_239 da fachada Oeste; (b) Imagem visual.....	67
Figura 4.17 - (a) Imagem térmica IR_240 da fachada Oeste; (b) Imagem visual.....	68
Figura 4.18 - (a) Imagem térmica IR_241 da fachada Oeste; (b) Imagem visual.....	68
Figura 4.19 - (a) Imagem térmica IR_242 da fachada Oeste; (b) Imagem visual.....	69
Figura 4.20 - Planta do edifício X, localização da análise 4.....	69
Figura 4.21 - (a) Imagem térmica IR_260 da fachada Sul; (b) Imagem visual .....	70
Figura 4.22 - (a) Imagem térmica IR_261 da fachada Sul; (b) Imagem visual .....	70
Figura 4.23 - (a) Imagem térmica da fachada Sul; (b) Imagem visual .....	71
Figura 4.24 - Planta do edifício II, localização da análise 5 .....	71
Figura 4.25 - (a) Imagem térmica IR_249 do canto Norte; (b) Imagem visual .....	72
Figura 4.26 - (a) Imagem térmica IR_250 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual .....	72
Figura 4.27 - (a) Imagem térmica IR_252 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual .....	73
Figura 4.28 - (a) Imagem térmica IR_253 da fachada Nordeste; (b) Imagem visual .....	73
Figura 4.29 - (a) Imagem térmica IR_254 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual .....	74
Figura 4.30 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 2.....	85
Figura 4.31 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 3.....	85
Figura 4.32 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 4.....	86
Figura 4.33 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 5.....	86
Figura 4.34 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para a temperatura de conforto	87
Figura 4.35 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 1 .....	88
Figura 4.36 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 4 .....	89
Figura 4.37 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 5 .....	90

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Comparação das necessidades anuais de energia de aquecimento e arrefecimento na Grécia.....	6
Quadro 2.2 - Classes de Higrometria propostas para Portugal [10] .....	10
Quadro 2.3 - Valor mínimo do Factor de Temperatura Superficial para prevenir o fenómeno de condensação [13] .....	24
Quadro 2.4 - Valores máximos admissíveis apresentados no RCCTE de 1990 para U, em função da zona climática. ....	35
Quadro 2.5 - Valores de referência apresentados no RCCTE de 1990 para U, em função da zona climática. ....	40
Quadro 2.6 - Valores de referência apresentados no RCCTE de 2006 para U, em função da zona climática. ....	40
Quadro 3.1 - Data de conclusão dos edifícios da FCT-UNL [37].....	52
Quadro 4.1 - Dados da análise experimental do local 1 .....	60
Quadro 4.2 - Dados da análise experimental do local 2 .....	62
Quadro 4.3 - Dados da análise experimental do local 3 .....	66
Quadro 4.4 - Dados da análise experimental do local 4 .....	69
Quadro 4.5 - Dados da análise experimental do local 5 .....	72
Quadro 4.6 - Factor de temperatura superficial mínimo experimental.....	75
Quadro 4.7 - Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo teórico segundo o exemplo 1 do Anexo B da EN ISO 13788 .....	77
Quadro 4.8 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental e teórico (1) .....	77
Quadro 4.9 - Comparação entre a temperatura mínima experimental e teórica (1) .....	78
Quadro 4.10 - Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo teórico segundo o exemplo 2 do Anexo B da EN ISO 13788 .....	80
Quadro 4.11 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental e teórico (2) .....	81
Quadro 4.12 - Comparação entre a temperatura mínima experimental e teórica (2) .....	81
Quadro 4.13 - Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 45% no local 2 .....	83

Quadro 4.14 - Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 50% no local 2.....	83
Quadro 4.15 - Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 55% no local 2.....	84
Quadro 4.16 - Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 60% no local 2.....	84
Quadro 4.17 - Coeficiente de transmissão térmica do local 1 .....	89
Quadro 4.18 - Coeficiente de transmissão térmica do local 4 .....	89
Quadro 4.19 - Coeficiente de transmissão térmica do local 5 .....	90
Quadro 5.1 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental, teórico (1) e teórico (2) .....	91
Quadro 5.2 - Comparação entre a temperatura superficial interior mínima experimental, teórica (1) e teórica (2).....	91
Quadro 5.3 - Diferenças de temperatura dos diversos locais .....	92

## Simbologia e Abreviaturas

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ )

$A$  – Área ( $\text{m}^2$ )

$\Psi$  – Coeficiente de transmissão térmica linear ( $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ )

$B$  – Desenvolvimento da ponte térmica medido pelo interior (m)

$R_{\text{si}}$  – Resistência térmica superficial interior ( $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ )

$R_{\text{se}}$  – Resistência térmica superficial exterior ( $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ )

$R$  – Resistência térmica ( $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ )

$f_{\text{Rsi}}$  – Factor de temperatura superficial (adimensional)

$f_{\text{Rsi, mín}}$  – Factor de temperatura superficial mínimo (adimensional)

$\theta$  – Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_i$  – Temperatura ambiente interior ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_e$  – Temperatura ambiente exterior ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_{\text{si}}$  – Temperatura superficial interior ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_{\text{si, mín}}$  – Temperatura superficial interior mínima ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_{\text{i, conf}}$  – Temperatura ambiente interior de conforto ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ )

$\lambda$  - Condutibilidade térmica do material ( $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ );

$Q$  - Fluxo de calor (W)

$q$  – Densidade de fluxo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$e$  – Espessura do elemento (m)

$\phi_i$  – Humidade relativa interior (%)

$\phi_e$  – Humidade relativa exterior (%)

$\phi_{\text{si}}$  – Humidade relativa na superfície interior (%)

$p_e$  – Pressão exterior (Pa)

$p_i$  – Pressão interior (Pa)

$p_{\text{sat, e}}$  – Pressão de saturação exterior (Pa)

$p_{\text{sat}, i}$  – Pressão de saturação interior (Pa)

$p_{\text{sat}}(\theta_{\text{si}})$  – Pressão de saturação na superfície interior (Pa)

$\Delta p$  – Variação da pressão (Pa)

FCT/UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

ADENE – Agência para a Energia

RCCTE – Regulamento do Comportamento e das Características Térmicas dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar interior nos Edifícios

ASIEPI – Assessment and Improvement of the EPBD Impact

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive

UE – União Europeia

CE – Comissão Europeia

PNAEE – Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A Comissão Europeia (CE) considera que é possível poupar cerca de 25% de energia nas indústrias transformadoras; 26% no sector dos transportes; 27% nos edifícios residenciais e 30% nos edifícios para uso comercial [1].

A Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) publicou, em 2007, o peso do consumo dos principais sectores de actividade económica portuguesa relativamente ao consumo final de energia.

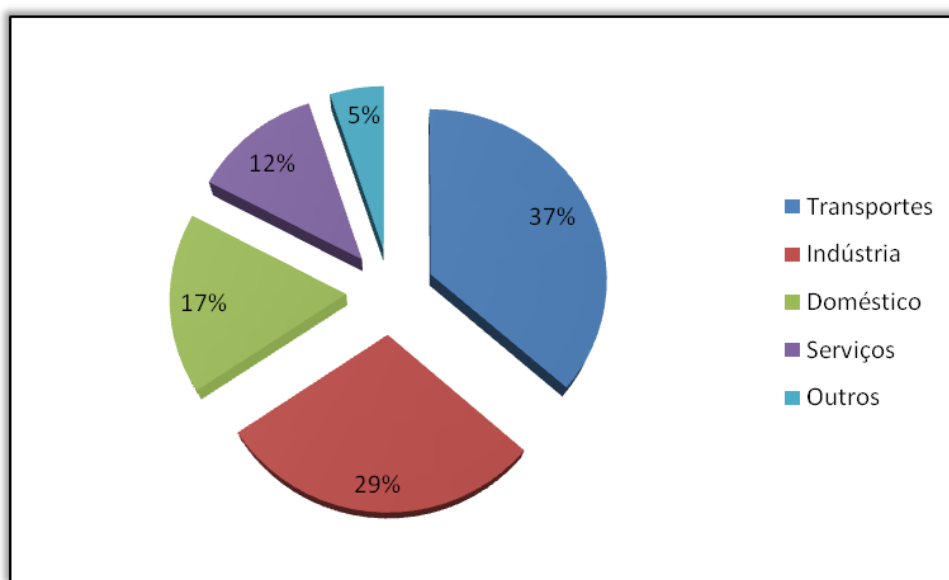


Figura 1.1 - Distribuição dos consumos energéticos em Portugal 2007 [fonte: DGEG]

Comparando com os dados de 1999, verifica-se que houve uma diminuição nos consumos relativamente aos Transportes e à Indústria, mas uma subida no sector dos Serviços e no Doméstico. Nos Transportes o consumo chegou aos 36,4%, na Indústria o valor é de 29,2%, no sector Doméstico atingiu-se os 17,1%, nos Serviços o consumo foi de 12,2% e nos outros sectores (onde se inclui a Agricultura, Pescas, Construção e Obras Públicas) o valor chegou aos 5,1%. Ao nível dos edifícios, o consumo atinge os 29,3% (Doméstico + Serviços) que é uma parte considerável no consumo energético em Portugal.



O sector dos Edifícios é responsável pelo consumo de 40% da energia final na Europa, mas metade deste consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que pode representar uma redução bastante considerável de emissão de CO<sub>2</sub>. Em termos de utilizações finais, os principais consumos de energia nos edifícios são os electrodomésticos, a iluminação, a preparação das águas quentes sanitárias e os aparelhos de climatização (aquecimento ou arrefecimento). Todos eles têm um peso significativo nos consumos energéticos de um edifício seja ele residencial ou de serviços. Para os edifícios de serviços da administração pública, está prevista uma poupança de 20% do consumo energético, que corresponde a cerca de 400 milhões de Euros durante um período de 10 anos. Segundo a ADENE, 45% dos consumos de energia eléctrica no sector público são repartidos entre as escolas (174 GWh/ano), os hospitais (144 GWh/ano) e os institutos (169 GWh/ano). O mesmo documento revela que os consumos no Ensino Superior rondam os 100 GWh/ano [2].

Em Portugal, cerca de 85% da energia consumida é importada e de origem fóssil (não renovável). No sentido de diminuir este valor, têm sido adoptadas algumas medidas nos edifícios relativamente aos consumos energéticos de climatização e para o aquecimento das águas quentes sanitárias. Tem-se assistido à aprovação de Decretos-Lei relativos ao comportamento térmico dos edifícios (RCCTE), à climatização (RSECE) e à certificação energética (SCE). Esta legislação obriga que o edifício utilize as energias renováveis como forma de garantir a sua sustentabilidade, adoptando sistemas solares térmicos (para o aquecimento de águas quentes sanitárias) e/ou sistemas solares fotovoltaicos (utilizados para converter a energia solar em energia eléctrica), além de obrigar a envolvente a cumprir certos requisitos.

A envolvente do edifício é a principal barreira entre o exterior e o interior. Se estiver bem isolada termicamente, não há grandes perdas de calor e os gastos energéticos de climatização são menores. Caso a envolvente esteja mal isolada e as zonas de portas e janelas mal calafetadas, cerca de 60% da energia dos sistemas de aquecimento é desperdiçada.

Em termos de características térmicas, a envolvente não é uniforme em todo o seu perímetro relativamente às taxas de transferência de calor. A colocação do isolamento térmico não se deve apenas centrar nas zonas correntes, mas também nas zonas particulares da construção, como são os casos dos pilares de betão armado ou talões de viga em zona

corrente, pilares de canto, caixas de estore, entre outros exemplos. As zonas onde a taxa de transferência de calor é maior do que as restantes são chamadas pontes térmicas.

As pontes térmicas podem contribuir significativamente para um aumento dos gastos energéticos (por promoverem as trocas de calor através da envolvente), mas também provocam heterogeneidades na temperatura superficial, condensações superficiais e algumas anomalias associadas. O estudo das zonas de pontes térmicas tem vindo a ser estudado ao longo dos anos, desde métodos de cálculos simplificados, detalhados ou por análises experimentais (termográficas). É importante o estudo destas zonas não só porque permite quantificar a perda térmica associada mas também porque há possibilidade de verificar se existe risco de ocorrência de desenvolvimento de bolores ou condensações superficiais, através do factor de temperatura superficial.

## **1.2 Objectivo**

Os principais objectivos deste trabalho são:

- a) Identificar casos de pontes térmicas nos edifícios do *Campus* da FCT-UNL e efectuar uma análise termográfica a esses locais;
- b) Verificar se existe risco de desenvolvimento de bolores ou anomalias associadas às condensações superficiais nos locais analisados, comparando o factor de temperatura superficial mínimo experimental com o teórico (calculado como nos exemplos da EN ISO 13788);
- c) Calcular os coeficientes de transmissão térmica máximos para determinado tipo de condições e verificar se os reais estão abaixo desse limite.

### **1.3 Plano de Trabalho**

Este trabalho está organizado em 5 capítulos.

No Capítulo 1 é feito um enquadramento ao tema, são definidos os objectivos do trabalho e é feito o plano de trabalho onde se resume o conteúdo de cada capítulo.

O Capítulo 2 é dedicado aos conceitos fundamentais da térmica de edifícios. Neste capítulo é apresentado o estado do conhecimento de alguns trabalhos feitos na Europa e em Portugal, as exigências de conforto térmico, os mecanismos de transmissão térmica, o balanço energético dos edifícios, as pontes térmicas e a legislação térmica existente em Portugal e na Europa.

No Capítulo 3 é feita uma pequena introdução sobre a história do Campus da FCT-UNL e sobre a termografia em edifícios, são explicadas algumas condições para que a análise termográfica se possa efectuar com sucesso, são indicados os equipamentos utilizados e é feita a metodologia da análise experimental.

No Capítulo 4 são apresentados os termogramas recolhidos durante a análise experimental, são calculados os valores do factor de temperatura superficial e do coeficiente de transmissão térmica máximo.

O Capítulo 5 é dedicado às conclusões sobre os resultados obtidos no capítulo anterior e são sugeridas algumas ideias para trabalhos futuros.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

### 2.1 Estado do Conhecimento

Nos últimos anos, o projecto Assessment and Improvement of the EPBD Impact (ASIEPI) recolheu alguns estudos sobre a influência das pontes térmicas no desempenho energético dos edifícios, que foram desenvolvidos em alguns Estados Membros da UE. Os estudos foram feitos em construções típicas dos países ou recorrendo a projectos-piloto de edifícios com alto desempenho [3].

Na Alemanha, uma melhoria nas zonas de ligação dos elementos reduziu em 11,4 kWh/m<sup>2</sup>ano as necessidades energéticas de aquecimento quando comparado com os edifícios tipo do país. Para edifícios com alto desempenho, as necessidades energéticas de aquecimento podem ser reduzidas de 4 a 5 kWh/m<sup>2</sup>ano, tratando-se de cerca de 15%.

Em França, os estudos foram realizados numa habitação familiar nova, onde foram identificadas e analisadas, com detalhe, nove pontes térmicas. Os resultados mostraram que, melhorando as zonas de ligação dos elementos, se pode reduzir as necessidades de energia primária de aquecimento em 18 kWh/m<sup>2</sup>ano, que é uma redução na ordem dos 15% (tal como na Alemanha).

Na Dinamarca foi utilizado um edifício novo, bem isolado termicamente, onde as zonas das juntas foram optimizadas para reduzir os efeitos das pontes térmicas. A energia primária economizada em relação aos edifícios novos, sem optimização das juntas, foi de 5,2 kWh/m<sup>2</sup>ano.

No caso da Holanda, foram usados cinco edifícios residenciais novos (todos eles de tipos diferentes: apartamentos no último piso, no piso intermédio ou no piso térreo e edifícios isolados), com construção de tijolo e foram calculados todos os comprimentos e coeficientes de transmissão térmica das pontes térmicas identificadas. O cálculo detalhado das pontes térmicas mostra que pode haver reduções de desempenho energético do edifício entre 3,75% e 11,25%, dependendo do tipo de habitação.

Na República Checa foi estudado o impacto das pontes térmicas na qualidade energética das habitações. Foram analisadas as necessidades energéticas de quatro casas

semelhantes e concluiu-se que o impacto das pontes térmicas em habitações dos anos 70 é de 7%, enquanto, com a melhoria da qualidade, o impacto em habitações actuais pode chegar aos 28%.

Os parceiros polacos da ASIEPI estudaram uma casa unifamiliar de dois pisos, onde identificaram e calcularam detalhadamente treze diferentes pontes térmicas. De acordo com esse cálculo, as pontes térmicas são responsáveis por 5,9% das perdas térmicas totais através da envolvente do edifício.

Na Bélgica foram usadas três abordagens diferentes em relação às pontes térmicas: dar-se pouca atenção, dar-se a atenção necessária e a prevenção do fenómeno. Do estudo, resultou que quando se dá pouca atenção às pontes térmicas, o modo de evitá-las é aumentar o coeficiente de transmissão térmica entre 0,06 e 0,15 W/m<sup>2</sup>K. Por outro lado, quando se dá a devida atenção, para evitar as pontes térmicas apenas se tem que aumentar o coeficiente de transmissão térmica entre 0,01 e 0,04 W/m<sup>2</sup>K.

O estudo na Grécia foi feito num edifício de três andares, equipado com sistemas de aquecimento e arrefecimento e com parede dupla de tijolo. Foram estudadas várias espessuras de isolamento térmico, assim como vários posicionamentos (interior, exterior e no interior da caixa de ar), sendo que os resultados no quadro 2.1 dizem respeito ao isolamento térmico de 5 cm na caixa-de-ar. O impacto das pontes térmicas foi verificado tanto para a situação de Inverno, como para o Verão.

Quadro 2.1 - Comparação das necessidades anuais de energia de aquecimento e arrefecimento na Grécia

	Unidades	Sem pontes térmicas	Com pontes térmicas
Necessidades anuais de energia de aquecimento	kWh/m <sup>2</sup> a	71	92
Necessidades anuais de energia de arrefecimento	kWh/m <sup>2</sup> a	30	31

O impacto das pontes térmicas nas necessidades anuais de energia de aquecimento é de 30% e nas necessidades anuais de energia de arrefecimento é de 3%. Por outro lado, de acordo com todos os estudos efectuados, não se pode desprezar o impacto das pontes térmicas nas necessidades de arrefecimento, especialmente quando esse valor for superior a 10% [4].

### 2.1.1 Os estudos das pontes térmicas em Portugal

Ao longo dos últimos anos, o estudo do comportamento térmico dos edifícios em Portugal tem vindo a aumentar de forma considerável. Investigações sobre o desempenho térmico das envolventes, a comparação entre os antigos e os novos regulamentos, a reabilitação térmica e as pontes térmicas são alguns exemplos do tipo de estudos efectuados.

A envolvente é um elemento fundamental para garantir o conforto térmico dos ocupantes de um edifício e, mais concretamente, as zonas de pontes térmicas são os locais onde as perdas térmicas são maiores.

Os estudos sobre as pontes térmicas têm tido dois objectivos distintos: o de quantificar a perda de calor através delas e determinar a distribuição de temperaturas que nelas se instala de forma a incluí-las no comportamento térmico de um edifício (usando métodos de cálculo simplificados, experimentais ou programas de análise numérica); e o de procurar regras práticas e soluções para a concepção dos pormenores construtivos de modo a reduzir as perdas térmicas e a evitar o risco de condensações (elaborando catálogos ou manuais de apoio à construção de edifícios).

Corvacho faz referência a um trabalho que, num quadro, sintetiza os estudos que foram realizados até então (figura 2.1). Foram os primeiros estudos sobre pontes térmicas, em que os investigadores elaboraram métodos de cálculo simplificados ou catálogos de pontes térmicas, calculando ainda valores de temperatura e de fluxos de calor.

Os primeiros trabalhos em Portugal sobre pontes térmicas surgiram por Corvacho, que dividiu as pontes térmicas em concentradas ou pontuais (em que as três dimensões são da mesma ordem de grandeza) e lineares (planas e não planas). Propôs também um programa de análise numérica das pontes térmicas denominado CONDUC e compara os seus resultados com os resultados da aplicação da norma ISO 6946/2, das fórmulas propostas pelas “Régles th-K-77”, do programa KOBRU82 (“programa de cálculo automático que utiliza o método das diferenças finitas para determinar a distribuição de temperaturas em regime permanente para situações de condução bidimensional”) e com os valores da experimentação. Além da validação do programa, conclui-se que é necessário uma análise atenta ao fenómeno das pontes térmicas podendo ter graves efeitos nas perdas térmicas e na ocorrência de condensações superficiais [5].

AUTOR	Descrição	TIPO DE PONTE TÉRMICA						
		Centros bidimensionais	Envidraçados	Pavimentos interiores	Parades divisorias	Pontes térmicas estruturais	Coberturas	Centros tridimensionais
Kunzel 1961	o	T/F						
Johannson 1968	*					T/F		
CSTB "Règles Th-K77" 1977	o	F	F	F	F	F	F	
Baum 1980	o					T/F		
Kupke 1980	x	T/F					T/F	
Erhorn/Gertis 1984	x		F					
Kasper 1984	x		T/F					
Standaert 1984	*	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F
Brunner 1985	x	T/F	T/F	T/F				
Erhorn/Tammes 1985	o					T/F		
Mainka/Paschen 1986	x	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F
Staelens 1986	o	F	F	F	F	F	F	
Wöltgens 1986	o	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F		
Heindl	x	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F	T/F
Erhorn 1988	x		F					

x - catálogo de pontes térmicas

o - método simplificado

\* - método numérico

T - cálculo de temperaturas

F - cálculo de fluxos de calor

Figura 2.1 - Os primeiros estudos sobre pontes térmicas [6]

A autora continuou o seu estudo mais tarde, recorrendo a duas células experimentais idênticas, mas com soluções construtivas diferentes. Identificou as zonas de pontes térmicas a estudar e mediu as temperaturas ambientes no interior e no exterior, as temperaturas superficiais exterior e interior e as densidades do fluxo de calor. Esta análise experimental serviu para testar soluções e definir valores fundamentais para a simulação numérica [7]. Na análise numérica foram testadas, não só as soluções experimentais, mas também outras

opções de forma a elaborar um catálogo de pontes térmicas [7]. Concluiu-se que o sistema de isolamento contínuo pelo exterior foi o que “conduziu a resultados mais satisfatórios” enquanto os outros sistemas de isolamento “requerem correcções específicas” na zona das pontes térmicas [6].

Mais tarde, Abreu estudou a correcção de pontes térmicas, com o objectivo de melhorar as condições de conforto térmico interior, assim como diminuir ou eliminar as anomalias resultantes dessas deficiências. A autora divide as intervenções nas zonas de pontes térmicas em reabilitação construtiva e reabilitação térmica. Foram estudadas diversas soluções de reabilitação térmica, como as forras cerâmicas no interior e no exterior (mas sem resultados significativos) ou o reforço da resistência térmica nas zonas de ponte térmica com recurso a materiais isolantes [8].

Para o sucesso da reabilitação térmica é essencial que a intervenção se prolongue em zona corrente da envolvente e não se limite ao elemento da descontinuidade [8 e 9]. Tal como Corvacho, também Abreu sugere que a melhor estratégia de garantir a conservação energética e diminuição das condensações é o isolamento contínuo em toda a envolvente com isolamento térmico pelo exterior (apesar de ser a solução menos económica).

A influência das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios foi estudada por Gouveia, onde são calculadas as necessidades energéticas de um edifício com soluções construtivas dos anos 80, dos anos 90 e da época actual. Verificou que ao longo dos anos, com a melhoria das soluções construtivas e introdução dos isolamentos térmicos, as necessidades de aquecimento diminuíram, assim como as perdas térmicas globais. Conclui-se, porém, que “não basta proceder a um isolamento eficaz nas zonas correntes” porque quanto maior for o nível do isolamento, maior será a importância das pontes térmicas. É interessante notar que, com a revisão do RCCTE, se “verificaram melhorias” no edifício com solução construtiva actual “ao nível das perdas por pontes térmicas planas”, mas um ligeiro agravamento ao nível das perdas por pontes térmicas lineares, podendo as “perdas por pontes térmicas atingir 20% das perdas térmicas globais” [9].

A existência de pontes térmicas pode provocar algumas anomalias associadas às condensações superficiais. Vieira segue os passos da EN ISO 13788 para o cálculo dos factores de temperatura superficial mas verifica que esta regulamentação é adequada “aos climas mais frios, onde o aquecimento das habitações é uma prática corrente e onde se



registam maiores gradientes de temperatura entre os ambientes interior e exterior”. O clima de Portugal não é tão agressivo como nos países do norte da Europa, é um clima mediterrâneo, onde as diferenças de temperatura entre os ambientes interior e exterior são muito mais reduzidas e, como tal, dificulta a aplicação do método desta norma. Assim, medidas as condições de humidade relativa e as temperaturas interiores em vários edifícios, o autor sugere que as classes de higrometria sejam diferentes [10].

Quadro 2.2 - Classes de Higrometria propostas para Portugal [10]

Classe de Higrometria	$\Delta p$ (Pa)	Tipo de edifício
Fraca	130	Escolas, escritórios
Média	400	Habitações não sobreocupadas e correctamente ventiladas
Forte	830	Habitações sobreocupadas ou não correctamente ventiladas
Muito forte	1000	Piscinas, certas indústrias



Figura 2.2 - Classes de Higrometria segundo a EN ISO 13788

São criadas quatro classes de higrometria mais ajustadas às condições climáticas de Portugal, que vão ser utilizadas mais à frente neste trabalho (quadro 2.2).

Para os meses mais frios das zonas I1, I2 e I3, o autor calcula o factor de temperatura superficial mínimo com base na temperatura de conforto de 20°C e para uma classe de higrometria Média. Os valores variam entre os 0,642, os 0,796 e os 0,826 conforme os locais dos edifícios estudados se situam nas zonas I1, I2 e I3, respectivamente [10].

## 2.2 Exigências de conforto térmico

Nos países desenvolvidos, a construção de um edifício já não se baseia apenas na segurança estrutural regulamentada pelos Eurocódigos, caracteriza-se também por responder a uma série de requisitos de habitabilidade e de conforto. Em Portugal, as principais exigências higrotérmicas são regulamentadas pelo “Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios”.

Em termos de exigências térmicas, o ambiente interior dos edifícios (em funcionamento livre) deve ser agradável o suficiente de modo a que, com o vestuário adequado, os ocupantes não tenham a sensação de desconforto.

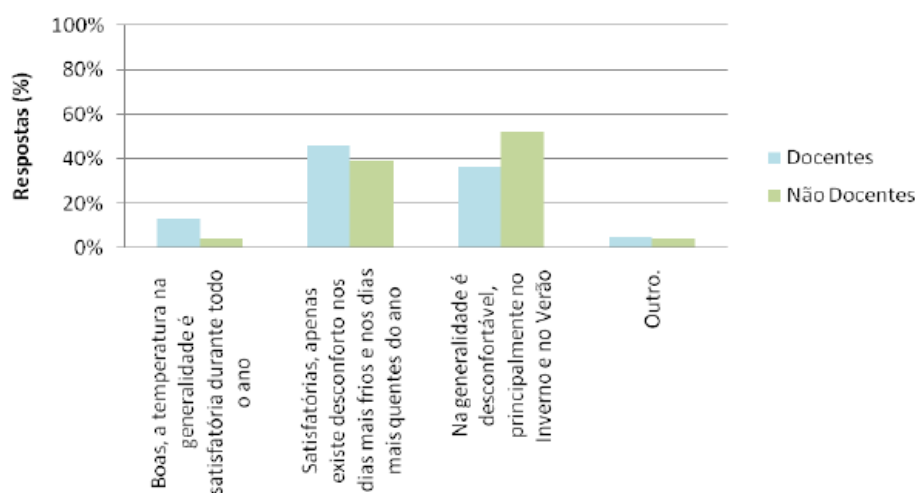


Figura 2.3 - Condições de conforto térmico em gabinetes ou locais de trabalho [11]

Como exemplo da importância do conforto térmico nos edifícios do Campus da FCT/UNL, Santos realizou um estudo em que cerca de 35% dos docentes da FCT-UNL inquiridos considera que as condições do local de trabalho ou gabinetes são desconfortáveis,

principalmente no Verão e no Inverno; 46% considera que são satisfatórias, apenas são desconfortáveis nos dias mais frios e nos dias mais quentes do ano; e só 13% considera que as condições de conforto são boas (figura 2.3). Os não docentes inquiridos consideram que, de modo geral, as condições são desconfortáveis (50%) ou satisfatórias (39%) [11].

Quanto ao conforto térmico das salas de aula, 41% dos docentes inquiridos considera que são desconfortáveis, principalmente no Inverno e no Verão; cerca de 38% sente-se confortável nas salas de aula, com excepção dos dias mais frios e mais quentes do ano; 11% considera a temperatura ambiente interior das salas de aula satisfatória durante todo o ano; e 8% respondeu que as salas são confortáveis no Inverno, mas demasiado quentes no Verão. (figura 2.4)

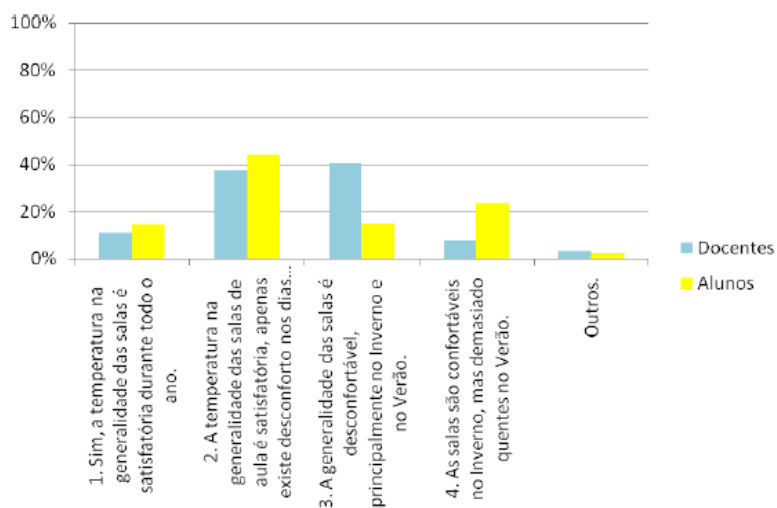


Figura 2.4 – Condições de conforto térmico em salas de aula [11]

Dos alunos inquiridos sobre o conforto térmico das salas de aula, 15% dos alunos considera que as salas de aula são desconfortáveis, principalmente no Inverno e no Verão; 44% considera que a temperatura nas salas é satisfatória, apenas existindo desconforto nos dias mais frios e mais quentes do ano; 15% respondeu que as salas são confortáveis durante todo o ano; e 24% dos alunos afirmam que as salas são confortáveis no Inverno, mas demasiado quentes no Verão. (figura 2.4)

Para que haja conforto é necessário que as trocas térmicas entre os ocupantes e o meio se processem de maneira a que os corpos não tenham que produzir nem perder calor em excesso, de forma a manter uma temperatura adaptada às suas actividades. Por essa razão,

considera-se que o conforto térmico é um “estado de espírito que expressa satisfação com a envolvente térmica” e depende de vários factores, tais como: temperatura do ar, humidade relativa, temperatura radiante média e velocidade do ar.

### **2.2.1 Parâmetros que influenciam o conforto térmico**

#### **Temperatura do ar**

De acordo com o RCCTE, o conforto térmico dentro de uma habitação é atingido quando no Inverno a temperatura interior não baixa dos 20°C e no Verão não excede os 25°C. Estes são os valores de referência, mas pode haver uma variação de 2°C desde que não seja por períodos muito longos ou, no máximo, 4°C no caso de locais não aquecidos na altura do Inverno [12].

A temperatura interior de espaços como escritórios, salas de conferências, auditórios, cafetarias/restaurantes ou salas de aula deve ser 24,5°C (com variação de 1,5°C) na altura do Verão e 22°C (com variação de 2°C) no Inverno [13].

#### **Humidade relativa**

A humidade sob a forma de vapor de água é outro factor que não pode ser esquecido quando se fala em conforto higrotérmico. Uma das formas do corpo humano libertar energia, para regular a sua temperatura, é através da transpiração. Uma dada temperatura pode ter diferentes sensações conforme for a humidade relativa, isto é, em dois locais com a mesma temperatura mas com humidades relativas diferentes, a sensação que se tem é que no local com humidade relativa menor está mais frio do que no local onde a humidade relativa é maior. Este exemplo mostra que quanto maior for a humidade relativa, maior a sensação de desconforto perante temperaturas mais elevadas uma vez que maior é a humidade absoluta e menos “espaço” há no ar para que a transpiração se evapore.

A humidade relativa do ar deve estar compreendida entre os 35% e os 85%, mas deve-se evitar que no Verão exceda os 60% [12].

## **Temperatura média radiante**

A temperatura média radiante é a temperatura média à superfície dos elementos que envolvem um espaço. Influencia tanto o calor perdido através da radiação do corpo como a perda de calor por condução, quando o corpo está em contacto com superfícies mais frias. A temperatura superficial do pavimento não deve exceder a temperatura interior em mais do que 6°C [14] ou deve estar compreendida entre 19 e 29°C para que não exista o desconforto de, por exemplo, termos o corpo quente e os pés frios [13].

## **Velocidade do ar**

A velocidade do ar para tipos de espaços como escritórios, salas de conferência, auditórios, cafetarias/restaurante ou salas de aula é de 0,16 m/s e 0,19 m/s, para a situação de Inverno e de Verão, respectivamente [15]. No Verão a velocidade poderá ser mais elevada, nomeadamente em locais de actividade pesada (oficinas, ginásios, etc.), mas não deve ultrapassar os 0,5 m/s [12]. De acordo com o RCCTE, a ventilação mínima adequada para edifícios que cumpram a NP 1037-1<sup>1</sup> deve ser de 0,6 renovações por hora [16].

## **2.3 Mecanismos de Transmissão Térmica**

Para estudar ou prever o comportamento dos edifícios face às acções a que estão sujeitos, é necessário conhecer o modo de propagação do calor através dos seus elementos construtivos. Por essa razão, antes de se entrar no estudo sobre o comportamento térmico dos edifícios, é importante ter a noção de como a energia lhes é transmitida.

A transmissão de energia entre dois elementos, ou entre dois pontos de um elemento, verifica-se sempre que entre eles se estabelece uma diferença de temperatura. A termodinâmica indica que o fluxo de calor se processa sempre no sentido do elemento com maior temperatura (foco quente) para o elemento com uma temperatura mais baixa (foco frio), ou seja, pode-se considerar que um elemento é um foco frio quando recebe energia e um foco quente quando liberta. Para que haja conforto e eficiência térmica, o ideal é que um edifício seja um foco frio no Inverno (recebe energia) e um foco quente no Verão (liberta energia).

---

<sup>1</sup> Norma Portuguesa 1037: Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural.

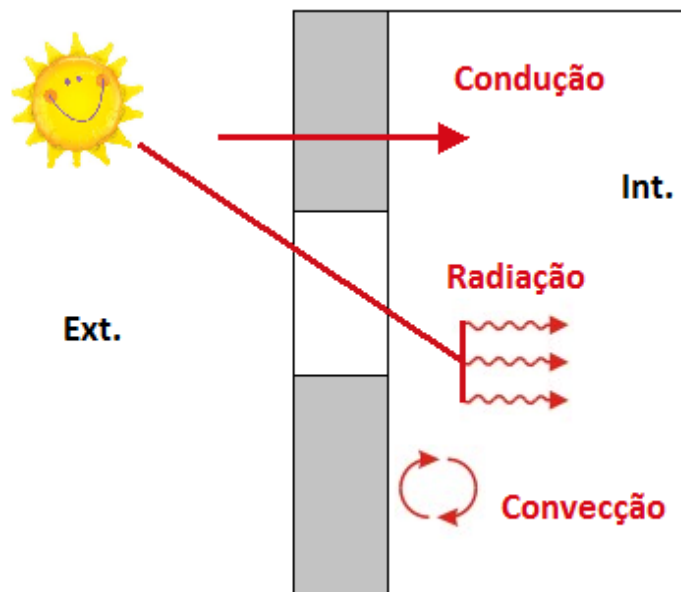


Figura 2.5 - Mecanismos de transmissão térmica

A transmissão de energia sob a forma de calor processa-se de três formas distintas: condução, convecção e radiação. As duas primeiras precisam de um meio sólido ou fluido para ocorrerem, enquanto a última não necessita. Apresenta-se, de seguida, a descrição destes processos de transferência de calor.

### **Condução**

A condução térmica é a propagação do calor por meio do contacto de moléculas de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes, através de movimentos e choques entre as suas partículas. Pode-se determinar o fluxo de calor transportado por condução através da lei de Fourier:

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\theta}{dX} \quad (1)$$

Em que,

$d\theta$  é a diferença de temperaturas entre duas partículas;

$dX$  é a distância entre as partículas (m).

Esta expressão de Fourier aplica-se apenas ao caso unidimensional, quando há apenas gradiente de temperatura na direcção X, e é de sinal negativo porque o fluxo de calor tem sempre o sentido da temperatura mais elevada para a mais baixa. Quanto maior for a diferença de temperatura entre os corpos, maiores são as trocas de calor entre os mesmos, até atingirem um estado de equilíbrio em que as trocas deixam de existir.

Por outro lado, o calor propaga-se pela continuidade dos materiais consoante a sua condutibilidade térmica. A condutibilidade térmica dos materiais é a capacidade que os mesmos têm para conduzir o calor, ou seja, é a quantidade de calor ( $Q$ ) que é transmitida através de uma espessura ( $e$ ), numa direcção normal à superfície de área  $A$ , devido ao gradiente de temperatura ( $\Delta\theta$ ) entre as suas fronteiras.

A expressão que traduz todas estas variáveis é:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta\theta}{e} \text{ [W]} \quad (2)$$

A quantidade de calor por ser calculada por unidade de área, através da simplificação:

$$q = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta\theta \text{ [W / m}^2\text{]} \quad (3)$$

A condução é responsável pela transferência de calor entre duas fronteiras sólidas e, nos edifícios, a quantidade e o intervalo de tempo dessa transferência são controlados pela condutibilidade dos materiais e pela inércia térmica, respectivamente.

No entanto, as paredes de um edifício são heterogéneas, isto é, são constituídas por várias camadas de materiais distintos (tijolo, isolamento térmico, caixa de ar, reboco, betão, etc.) dispostos paralela ou perpendicularmente ao sentido do fluxo.

Na verdade, o que acontece é que uma parede é composta por vários elementos em série, com várias temperaturas, espessuras e condutibilidades térmicas. Nestes casos, o fluxo de calor que atravessa a parede desde o interior até ao exterior é dado pela equação 4 [13].

$$q = \frac{\theta_i - \theta_e}{\sum_{j=1}^n R_j} \quad [W / m^2] \quad (4)$$

Por outro lado, existem locais da envolvente que são compostos por zonas de diferentes materiais e de diferentes áreas, dispostas em paralelo relativamente ao sentido do fluxo. Nestes casos considera-se que todas as paredes estão sujeitas à mesma diferença de temperatura, que as paredes podem ser de materiais e/ou dimensões diferentes e que o fluxo de calor total é igual à soma do fluxo de calor de cada parede individual (equação 5) [13].

$$Q = \sum_j \frac{A_j}{R_j} \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (5)$$

### Convecção

A convecção é o mecanismo de transmissão térmica típica dos fluidos (nos edifícios, o fluido na qual acontece este fenómeno é o ar). Este processo de trocas de calor pode ocorrer de forma natural (por diferenças de temperatura) ou de forma forçada (pelo vento ou por sistemas de condicionamento do ar) e pode ser de dois tipos: convecção ar-ar entre duas massas de ar com diferentes temperaturas ou convecção ar-sólido entre a face da envolvente e o ambiente adjacente (interior ou exterior).

A convecção ar-ar ocorre através das diferenças de temperatura entre duas massas de ar, que, com densidades diferentes, provocam as chamadas correntes de convecção. A massa de ar mais quente sobe, ocupando o espaço antes preenchido pela massa de ar mais fria, fazendo-a descer, e este ciclo repete-se até as temperaturas das duas massas de ar estarem equilibradas.

A convecção ar-sólido aproxima-se do fenómeno da condução uma vez que a massa de ar entra em contacto com a superfície da envolvente, havendo trocas de calor. A equação que descreve este fenómeno foi estabelecida por Newton em 1701 e, tendo como base a expressão da condução, o fluxo de calor transmitido entre uma superfície e um fluido é proporcional à área considerada e à diferença de temperatura estabelecida [14]:

$$Q = h_c \cdot A \cdot (\theta_s - \theta_f) \quad [W] \quad (6)$$



Em que,

$h_c$  é a conductância térmica do material ( $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ );

$A$  é a área da superfície em contacto com o fluido ( $m^2$ );

$\theta_s$  é a temperatura da superfície da envolvente ( $^\circ C$ );

$\theta_f$  é a temperatura do ar ( $^\circ C$ ).

A conductância térmica ( $h_c$ ) é o inverso da resistência térmica e estas duas grandezas traduzem a forma como um elemento se deixa atravessar com maior ou menor facilidade na sua espessura total por uma diferença unitária de temperatura.

## **Radiação**

Ao contrário dos mecanismos de transmissão térmica por condução e por convecção, este processo não necessita de qualquer suporte físico para ocorrer. O processo de transmissão de calor por radiação é conseguido através da propagação das ondas electromagnéticas, no vácuo.

Todos os corpos emitem e recebem radiação e a quantidade de energia emitida é apenas função da sua temperatura absoluta (nível energético do corpo) e das propriedades da sua superfície. Cada superfície tem uma característica chamada emissividade (capacidade de emitir radiação) que pode variar entre 0 e 1. A Lei de Kirchhoff diz que, em equilíbrio térmico, a emissividade de um corpo ou superfície é igual ao seu poder de absorção [14].

A lei que rege a quantidade de energia radiada por um corpo negro foi estabelecida experimentalmente por Stefan em 1879 e exposta teoricamente por Boltzman em 1884, diz que a “energia emitida por um corpo negro por segundo e por área superficial é directamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta da superfície”, ou seja:

- Quando o corpo está a emitir livremente para o espaço:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \text{ [W]} \quad (7)$$

- Quando um corpo à temperatura  $T$  está a emitir para um corpo próximo à temperatura  $T_c$ :

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_c^4) \text{ [W]} \quad (8)$$

Em que,

$\varepsilon$  é a emissividade da superfície (adimensional);

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ );

$A$  é a área da superfície emissora ( $\text{m}^2$ );

$T$  é a temperatura absoluta da superfície emissora (K);

$T_c$  é a temperatura absoluta da superfície emissora vizinha (K).

Os fenómenos de radiação térmica em edifícios acontecem no domínio dos pequenos e grandes comprimentos de onda. Os fenómenos de pequeno comprimento de onda estão associados a corpos de elevadas temperaturas e são representados pela radiação solar. A radiação atravessa o espaço e incide nos edifícios, quer no exterior (em paredes e coberturas), quer no interior (a partir dos envidraçados). Esta radiação, depois de absorvida pelas superfícies dos corpos, transforma-se em energia térmica e, em função do nível de temperatura, há trocas de radiação de longo comprimento de onda (baixas temperaturas) com os objectos e as superfícies que se encontram no campo visual.

Nem toda a radiação solar que incide num edifício é absorvida, há também uma parte que é reflectida e outra que é transmitida.

## **2.4 Balanço Energético dos Edifícios**

Ao longo dos últimos anos tem-se verificado um acréscimo das exigências de conforto térmico, o que pressupõe um estudo pormenorizado sobre as perdas e ganhos térmicos de um edifício através da sua envolvente, que permita prever quais as necessidades de climatização. A equação de equilíbrio entre os ganhos e as perdas energéticas designa-se por balanço energético.

O balanço energético é efectuado com a temperatura do ar interior constante (em regime permanente) e entram para esta equação os ganhos solares através dos envidraçados, os ganhos internos (devido à ocupação e aos equipamentos), a energia fornecida de aquecimento ou arrefecimento e as perdas através da envolvente (por ventilação ou por condução).

A revisão da Directiva 2002/91/CE vai ter um impacto bastante interessante no balanço energético porque prevê que, a partir de 2020, todos os edifícios novos terão que ser “energia quase zero”. Isto pressupõe que toda a energia que o edifício necessita para funcionar em condições de conforto vai ser (“quase”) a mesma que o edifício obtém através dos seus sistemas de ganhos térmicos (fachada envidraçada voltada a Sul, painéis fotovoltaicos/térmicos, etc.). Se isto acontecer o balanço térmico do edifício passa a ser zero [15].

As várias trocas de calor entre o exterior e o interior do edifício, que dão origem a ganhos e perdas energéticas, dependem de três factores que não podem ser ignorados: o isolamento térmico da envolvente do edifício, o coeficiente de transmissão térmica dos seus elementos constituintes e a inércia térmica.

### **2.4.1 Inércia Térmica**

A inércia térmica é a maior ou menor capacidade que um determinado elemento tem de absorver o calor e a maior ou menor facilidade com que o liberta. Esta é uma característica muito importante nos edifícios porque permite que haja um desfasamento temporal ( $\mu$ ) nos

picos de temperatura e um amortecimento da onda de calor ( $\Phi$ ), que contribui de forma significativa para a obtenção de melhores condições de conforto (figura 2.6).

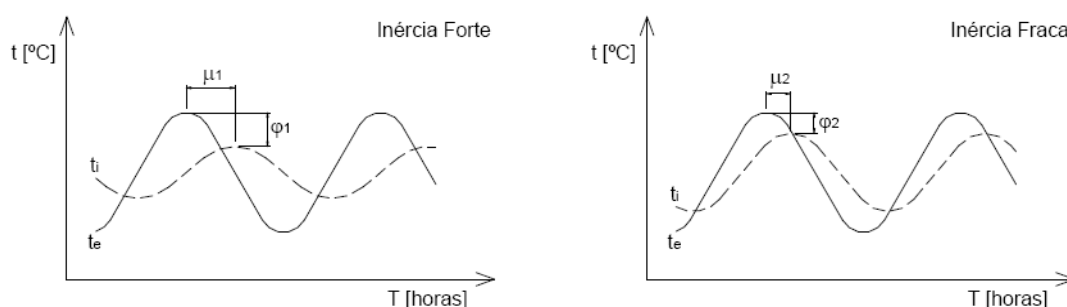


Figura 2.6 - Comparação entre Inércia Térmica forte e fraca [17]

A velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvido estão relacionadas com a condutibilidade térmica e a massa superficial útil, respectivamente, de cada um dos elementos de construção e determinam a inércia térmica de um edifício. O RCCTE definiu três classes de inércia térmica: forte, média e fraca.

Quando as características dos elementos construtivos são bem aproveitadas, é possível diminuir os gastos energéticos de aquecimento durante o Inverno e os gastos energéticos de arrefecimento durante o Verão. Os elementos absorvem as radiações solares durante o dia e libertam o calor durante a noite, fazendo com que no Inverno a temperatura dentro das habitações seja equilibrada entre o dia e a noite. No Verão a situação é idêntica, a envolvente vai libertar o calor para dentro das habitações durante a noite, mas, para combater este acréscimo de temperatura, devem-se abrir as janelas, permitindo que o calor saia, e o ambiente interior volta a ser confortável. Este desfasamento entre os picos de temperatura e o momento em que o calor é libertado depende do tipo de inércia térmica, sendo que um edifício com uma inércia térmica forte tem menos gastos energéticos que um edifício com inércia térmica fraca.

A inércia térmica é função do posicionamento do isolamento térmico e das características do revestimento superficial.

Para o cálculo da inércia térmica apenas se contabilizam os materiais que estão entre o ambiente interior e o isolante térmico, pelo que, para se obter uma inércia térmica forte, é essencial que o isolante térmico esteja aplicado pelo exterior. Do isolante térmico para o

exterior, o fluxo de calor é muito reduzido. Assim, é fundamental que o isolante térmico esteja bem posicionado porque, como se observa na figura 2.6, o isolamento pelo exterior consegue manter uma temperatura mais regular ao longo do dia (imagem da esquerda), enquanto o isolamento pelo interior continua com grandes picos de temperatura (imagem da direita) não havendo elementos que armazenem o calor.

As definições e metodologias de cálculo estão descritas no nº2 do Anexo VII do RCCTE.

#### 2.4.2 Coeficiente de Transmissão Térmica, U

Os elementos que compõem a envolvente do edifício não podem ser vistos de forma individualizada, é a composição desses vários elementos que forma a envolvente e, como tal, deve ser analisada como um todo. É necessário definir um parâmetro que tenha em conta todos os fenómenos de trocas de calor associados à envolvente. Designa-se por Coeficiente de Transmissão Térmica e é representado pela letra U (antigamente a simbologia utilizada era K, mas após a introdução do novo RCCTE mudou para U).

O coeficiente de transmissão térmica é expresso em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  e exprime a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária do elemento, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este separa. O valor de U é dado por:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \Leftrightarrow U = \frac{1}{R_t} \quad (9)$$

Em que,  $R_j$  é a soma de todas as resistências dos elementos j que constituem a envolvente.

As resistências térmicas superficiais resultam do efeito combinado da transmissão de calor por convecção e por radiação. Como existem processos de convecção e de radiação no interior e no exterior da envolvente, formam-se zonas onde o fluxo de calor encontra resistências ( $R_{si}$  e  $R_{se}$ ) no contacto com a sua superfície. Os valores do  $R_{si}$  e  $R_{se}$  estão disponíveis no Quadro VII.1 do RCCTE, são fixados conforme a posição (vertical ou

horizontal) da envolvente a considerar e, no caso de ser horizontal, se o fluxo de calor é ascendente ou descendente.

No ITE50 [18] podem-se encontrar os valores dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos mais comuns que constituem uma envolvente.

O RCCTE define valores máximos admissíveis de U para elementos opacos (Quadro IX.1 do RCCTE) e valores de U de referência (Quadro IX.3 do RCCTE).

É essencial salientar que o valor de U de uma heterogeneidade inserida na zona corrente, não poderá exceder o dobro do valor de U da zona corrente adjacente da envolvente opaca vertical ou horizontal.

### 2.4.3 Factor de Temperatura Superficial

Para avaliar o impacto a nível térmico e consequente risco de condensações nas heterogeneidades presentes nos elementos construtivos, existem parâmetros que dão um valor informativo importante para a prevenção dos fenómenos e das anomalias associadas. O Factor de Temperatura Superficial é um desses parâmetros [13]. É adimensional e pode ser calculado para qualquer ponto do paramento interior através do quociente entre a diferença de temperatura superficial interior e a temperatura ambiente exterior e a diferença de temperatura ambiente interior e a exterior, ou seja:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (10)$$

O valor mínimo do Factor de Temperatura Superficial ocorre sobre a ponte térmica, onde a temperatura superficial interior atinge o seu valor mínimo:

$$f_{Rsi, \min} = \frac{\theta_{si, \min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (11)$$

Quanto menor for o valor do Factor de Temperatura Superficial, maior o risco de ocorrência de condensações e de desenvolvimento de bolores [13]. No quadro 2.3 são apresentados os valores mínimos recomendados para os diversos tipos de ocupação.

Quadro 2.3 - Valor mínimo do Factor de Temperatura Superficial para prevenir o fenómeno de condensação [13]

Classe de Humidade	Edifício/ Local	$f_{Rsi, \text{mín.}}$
1	Armazéns	0,30
2	Escritórios, lojas	0,50
3	Edifícios residenciais com pequena ocupação	0,65
4	Edifícios residenciais com elevada ocupação, pavilhões desportivos, cozinha, cantinas, locais com aquecedores a gás sem extracção	0,80
5	Locais especiais, como piscinas, lavandarias	0,90

Vem também na literatura [19] que este factor, para paredes planas e homogéneas, pode ser dado pela expressão:

$$f_{Rsi} = 1 - R_{si} \cdot U \quad (12)$$

Assim, se o factor for 1, significa que o coeficiente de transmissão térmica é nulo e o isolamento térmico é perfeito. Por outro lado, se o factor é nulo significa que não há isolamento térmico e que  $U=1/R_{si}$ . Este factor indica o nível de isolamento térmico e tem a grande vantagem de ser capaz de ser calculado ou medido em qualquer zona da envolvente, mesmo nas zonas de pontes térmicas [19].

O factor de temperatura superficial permite verificar se existe a possibilidade de ocorrência de condensações superficiais ou até mesmo de desenvolvimento de bolores na envolvente. Em Portugal não existe um valor mínimo na legislação, mas muitos dos países europeus baseiam-se neste factor para regulamentar a ocorrência de condensações superficiais(ver capítulo 2.6.3). De uma maneira geral, os valores mínimos do factor de temperatura superficial variam entre 0,50 e 0,80, conforme o tipo de edifício ou o tipo de utilização.

## 2.5 Pontes Térmicas no campo da Engenharia Civil

Considere-se um elemento plano da envolvente de um edifício (parede ou pavimento), composto por diversas camadas de materiais homogêneos dispostas em série. Uma das suas dimensões, a espessura, é muito mais reduzida que as restantes, estabelecendo-se um gradiente de temperatura entre as duas superfícies que delimitam o elemento. Este gradiente dá lugar a um fluxo de calor, unidireccional, por condução, na direcção perpendicular às superfícies.

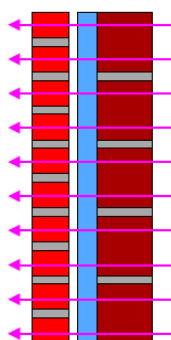


Figura 2.7 - Fluxo de calor unidireccional [43]

A condução unidireccional é uma aproximação perfeitamente válida para a grande maioria dos elementos da envolvente do edifício, mas existem situações em que, devido à heterogeneidade dos elementos ou à geometria da envolvente, o fluxo deixa de ser unidireccional e passa a ser bidireccional ou tridireccional. Estas zonas são consideradas pontes térmicas.

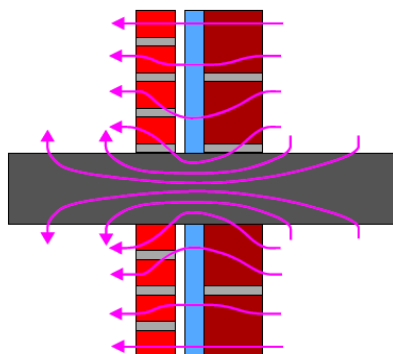


Figura 2.8 - Fluxo de calor bidireccional devido à ponte térmica [43]



### 2.5.1 A noção de ponte térmica

Segundo a norma EN ISO 10211 [20], uma ponte térmica é toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada. Essa alteração pode ser causada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas ou por uma modificação da geometria da envolvente. A ponte térmica é toda a parte da envolvente de um edifício onde não é possível admitir a hipótese de unidireccionalidade do fluxo de calor (como explicado anteriormente) e, consequentemente, deixa de ser correcta a abordagem de cálculo normalmente usada em térmica de edifícios, que pressupõe a uniformidade da resistência térmica dos elementos na sua área.

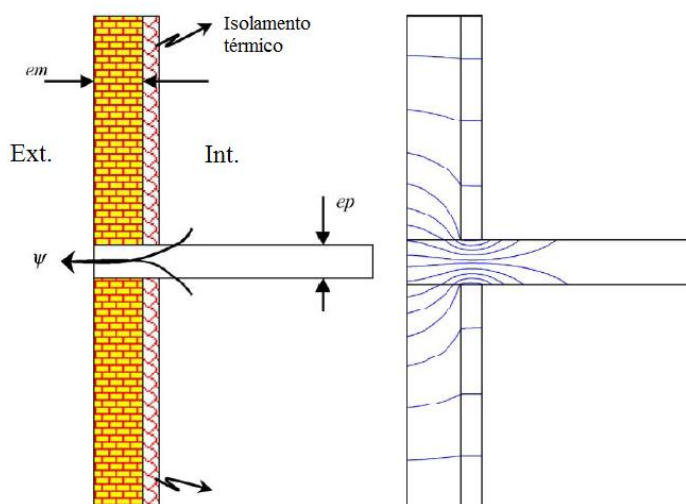


Figura 2.9 - Ponte térmica linear e respectivas linhas do fluxo de calor [adaptado 21]

Uma ponte térmica é, também, o termo utilizado para considerar fenómenos localizados de transferência de calor na envolvente dos edifícios, que são consentidos devido a uma redução das características de isolamento térmico desses locais relativamente à zona corrente. Nas zonas de pontes térmicas as linhas do fluxo de calor deixam de ser rectilíneas, passando a tomar as direcções em que a resistência à passagem do calor seja menor.

Assim, a distribuição da temperatura superficial interior é bastante heterogénea, levando a que as isotérmicas se deformem. Apesar da deformação das linhas isotérmicas, o fluxo de calor é sempre perpendicular a elas.

Pode-se considerar a existência de pontes térmicas geométricas e pontes térmicas materiais. As pontes térmicas geométricas não causam efeitos importantes ao nível dos

desperdícios de energia porque o isolamento térmico não é interrompido, apenas pode ser deformado, por exemplo, devido às mudanças de direcção ou às mudanças de espessura da envolvente. As isotérmicas não sofrem grandes alterações, mas ainda assim, sempre que as condições são críticas, o abaixamento da temperatura superficial interior pode causar o aparecimento de anomalias. As pontes térmicas materiais existem sempre que a camada de isolamento térmico é interrompida ou é atravessada por um material com maior condutibilidade térmica. As isotérmicas são abruptamente alteradas e as linhas do fluxo de calor concentram-se bastante sobre a ponte térmica, causando consequências muito mais graves neste caso do que nas pontes térmicas geométricas [19].

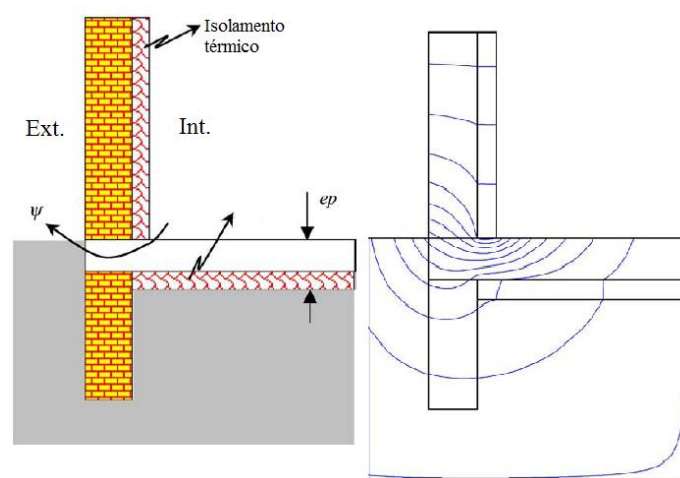


Figura 2.10 - Ponte térmica linear e linhas do fluxo de calor concentradas [adaptado 21]

Geralmente são considerados três tipos de pontes térmicas: heterogeneidades inseridas na envolvente, pontes térmicas lineares e pontes térmicas pontuais.

As heterogeneidades inseridas na zona corrente da envolvente consideram-se pontes térmicas, uma vez que existe maior taxa de transferência de energia nesses sítios devido à diminuição da resistência térmica. Alguns exemplos deste tipo são os pilares de betão armado situados entre paredes em zona corrente ou o talão de viga, ou seja, locais onde o valor do coeficiente de transmissão térmica é diferente da zona corrente (ver figura 2.11).

As pontes térmicas lineares (bidimensionais) resultam da ligação entre dois ou mais elementos estruturais e caracterizam-se por estarem associadas ao coeficiente de transmissão térmica linear  $\psi$  (W/m.°C). A ligação da fachada com a caixa de estore, a ligação entre duas paredes ou entre uma parede e um pavimento são alguns, dos inúmeros, exemplos deste tipo de pontes térmicas.

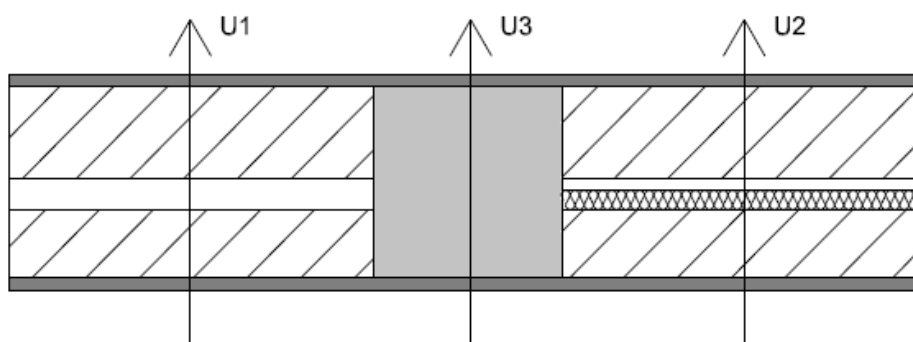


Figura 2.11 - Heterogeneidade inserida na envolvente

As pontes térmicas pontuais ocorrem em extremidades tridimensionais, como é o caso dos cantos, ou quando uma parede com isolamento é perfurada por um elemento com condutibilidade térmica mais elevada. São caracterizadas por um coeficiente de transmissão térmica pontual  $\chi$  (W/°C), mas podem ser desprezadas.

Qualquer tipo de ponte térmica provoca uma distribuição heterogénea da temperatura superficial interior e um acréscimo das trocas de calor entre o interior e o exterior através da envolvente, o que conduz a um aumento dos consumos energéticos para a manutenção das condições de conforto. Como nas zonas de pontes térmicas a temperatura superficial é mais baixa, há risco de ocorrência de condensações superficiais e, consequentemente, o aparecimento de problemas inerentes a estas heterogeneidades.

## 2.5.2 A importância das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios

Para evitar a ocorrência de pontes térmicas, é necessário que o isolamento térmico ocupe toda a envolvente. É incoerente isolar termicamente as zonas correntes e esquecer as restantes zonas da envolvente.

Corvacho analisa um exemplo de uma ligação entre duas paredes duplas exteriores com um pilar de canto e estuda qual a percentagem de perda térmica em função da existência ou não de isolamento térmico na caixa-de-ar. Quando não se coloca isolamento, a perda térmica é maior mas o acréscimo devido à ponte térmica é apenas 10% da perda. No caso em que inclui o isolamento térmico, a perda térmica diminui significativamente mas o acréscimo passa a ser 42% da perda [6]. Este exemplo serve para se perceber que à medida que se vai

melhorando o isolamento térmico da envolvente, é importante não desprezar as pontes térmicas porque, nestes casos, o acréscimo de perda térmica é bastante elevado.

As quebras, faltas ou colocação desajustada dos isolamentos térmicos conduzem a gastos energéticos acrescidos, que acabam por ser uma parcela importante das perdas que ocorrem através da envolvente. O fluxo de calor vai sempre procurar o caminho mais “fácil” de percorrer, escolhendo as zonas onde o isolamento é mais fraco, ou seja, as zonas de pontes térmicas. Quanto mais eficiente for o isolamento destas zonas, melhor é o controlo das perdas, menores são as trocas de calor entre o interior e o exterior, melhor é o desempenho térmico do edifício e menores são os gastos energéticos para que as condições de conforto sejam atingidas.

### **2.5.3 Coeficiente de Transmissão Térmica Linear, $\psi$**

O método de cálculo do fluxo de calor nas zonas de pontes térmicas não é, em termos de princípio, diferente do método geral de cálculo do fluxo de calor. O método geral envolve sempre um coeficiente associado a uma diferença de temperatura e, no caso da diferença de temperatura ser entre o ambiente interior e exterior, esse coeficiente denomina-se por coeficiente de transmissão térmica (U).

No caso do fluxo de calor nas zonas de pontes térmicas lineares existe também um coeficiente que, associado a uma diferença de temperatura, traduz a taxa de transferência de calor por ela originada. Esse coeficiente é chamado de coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ).

Os valores do coeficiente de transmissão térmica linear estão tabelados no Anexo IV do RCCTE. Para pavimentos em contacto com o terreno utilizam-se os valores da Tabela IV.2.1, para paredes em contacto com o terreno os valores estão na Tabela IV.2.2 e para as pontes térmicas lineares os valores estão presentes nos quadros da Tabela IV.3. Nesta última tabela são “quantificados os valores de  $\psi$  para as situações mais correntes”, mas no caso de pontes térmicas não consideradas nos quadros, pode utilizar-se um valor convencional de  $\psi = 0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

#### 2.5.4 As perdas de energia devido às pontes térmicas

Apesar de uma ponte térmica se caracterizar por ser uma zona onde o fluxo de calor deixa de ser rectilíneo, pode-se considerar que as heterogeneidades, por estarem inseridas na zona corrente da envolvente, têm um fluxo de calor unidireccional (esta é uma simplificação que costuma ser utilizada para efeitos de cálculo). O método de cálculo é semelhante ao fenómeno de transmissão de calor por condução (equação 2).

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{(\theta_i - \theta_e)}{e} \Leftrightarrow Q = A \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \Leftrightarrow q = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

Assim, a quantidade de energia perdida através de uma heterogeneidade inserida na envolvente é a diferença entre o fluxo de calor na zona da ponte térmica e o fluxo de calor na zona corrente da envolvente.

As pontes térmicas lineares não podem ser analisadas da mesma forma que as heterogeneidades inseridas na envolvente, o fluxo de calor é bidireccional e não se pode fazer nenhuma simplificação. Assim, o fluxo de calor bidireccional que inclui as pontes térmicas lineares é dado por:

$$Q = \Psi \cdot B \cdot (\theta_i - \theta_e) \text{ [W]} \quad (13)$$

No caso de existirem várias pontes térmicas num só compartimento, é possível calcular as perdas de todas elas recorrendo a [20]:

$$Q = \left( \sum_{m=1}^M \Psi_m \cdot B_m + \sum_{k=1}^K U_k \cdot A_k \right) \cdot (\theta_i - \theta_e) \text{ [W]} \quad (14)$$

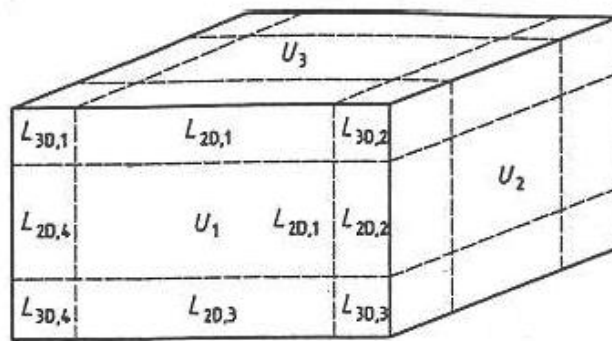


Figura 2.12 – Exemplo de envolvente exterior com várias zonas de pontes térmicas [20]

As perdas através das pontes térmicas só fazem sentido quando comparadas com as perdas das soluções perfeitas, isto é, com as perdas de uma envolvente que tem as pontes térmicas corrigidas.

### 2.5.5 Anomalias associadas às pontes térmicas

Quando se fala em pontes térmicas, pensa-se sempre no abaixamento da temperatura nos paramentos interiores. Este fenómeno, além de aumentar os consumos energéticos, pode ainda provocar diversas anomalias, como as condensações superficiais. A existência desta anomalia provoca outros problemas relacionados com o aparecimento de fungos ou bolores ou com a durabilidade dos materiais e pode afectar a salubridade dos locais.

#### Condensações Superficiais

A principal anomalia associada às pontes térmicas é a humidade de condensação. O ar interior contém uma determinada quantidade de vapor de água que depende da produção de vapor no local, da ventilação e da quantidade de vapor trazida pelo ar proveniente do exterior. O arrefecimento de uma massa de ar pode provocar condensações de vapor de água sempre que seja atingido o limite de saturação<sup>2</sup> a uma dada temperatura. Para existir este fenómeno é necessário que as condições atmosféricas sejam favoráveis, tanto no interior dos edifícios, como no exterior. O risco de ocorrência de condensações é máximo durante a noite e em condições de céu limpo, se estivermos a analisar a envolvente exterior [22].

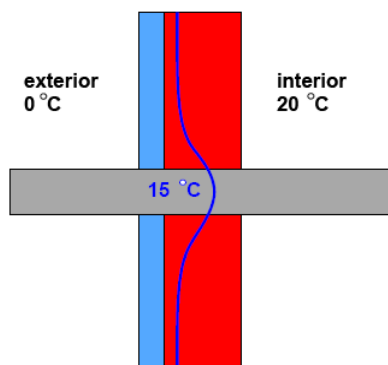


Figura 2.13 - Isolamento térmico pelo exterior (não há condensações) [43]

<sup>2</sup> O limite de saturação é a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter, variando na razão directa da temperatura.

Em condições de Inverno, é natural que as temperaturas superficiais interiores da envolvente exterior estejam mais frias que a temperatura ambiente interior [23].

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (15)$$

Percebe-se facilmente que nas zonas onde existem pontes térmicas, a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais aumenta relativamente às zonas correntes da envolvente. Se a temperatura superficial interior descer abaixo do ponto de orvalho da quantidade de vapor existente no ar, o ar do local atinge o ponto de saturação e há condensações superficiais nos paramentos.

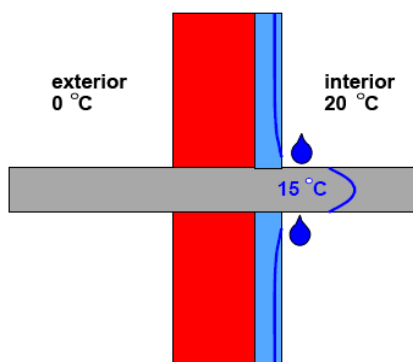


Figura 2.14 - Isolamento térmico pelo interior (há condensações) [43]

Pode-se analisar um exemplo simples recorrendo ao diagrama psicométrico no Anexo 1. Se a temperatura do ar interior for de 20°C e a humidade relativa de 80%, então a temperatura do ponto de orvalho que corresponde às condições termo-higrométricas do ar interior é de, aproximadamente, 16°C. Isto significa que em todas as superfícies interiores com uma temperatura superficial mais baixa que 16°C ocorrem condensações superficiais [23].

Algumas das formas de evitar a ocorrência de condensações superficiais passam por promover a ventilação do espaço (reduzindo a quantidade de vapor de água presente no ar); aumentar o isolamento térmico (em especial nas zonas de pontes térmicas) ou aumentar a temperatura ambiente interior, aumentando assim as temperaturas superficiais interiores [23].



Figura 2.15 – Acumulação de microrganismos no Edifício VII da FCT/UNL

### **Heterogeneidade da temperatura superficial interior**

Como já foi referido anteriormente, as pontes térmicas provocam um abaixamento da temperatura superficial interior, provocando heterogeneidades na temperatura superficial da envolvente. Este factor, se atingir certas amplitudes, pode provocar manchas desiguais na fachada (os microrganismos acumulam-se mais facilmente nos sítios húmidos) e alterações de diferentes formas nas tintas ou revestimentos, não beneficiando a estética do edifício.

### **Desenvolvimento de bolores**

Para que haja desenvolvimento de bolores é preciso estarem reunidas uma série de condições ideais. Entre as várias condições encontram-se duas que existem sempre no interior dos edifícios: a presença de oxigénio em quantidade suficiente e a temperatura estar entre os 5°C e os 25°C.

Outros factores, como a presença de humidade relativa (superior a 80%) ou a ausência de luz solar incidente, também propiciam o aparecimento e desenvolvimento de bolores. Para se desenvolverem é preciso que a humidade seja elevada e em níveis constantes durante um certo período de tempo. A ausência de luz solar incidente conduz ao desenvolvimento de bolores porque nem todos os compartimentos têm a fachada orientada de modo a permitirem a entrada da radiação solar.



A fraca movimentação do ar promove o aparecimento de bolores, o que acontece nas zonas atrás de móveis e nos cantos (zonas de possíveis pontes térmicas) [24]. Os bolores também necessitam de nutrientes para se desenvolverem e encontram-os nos revestimentos das paredes. A presença de bolores no interior dos compartimentos não é aconselhável porque, além de ser esteticamente desagradável, causa odores, tem consequências graves para a saúde dos ocupantes e degrada os revestimentos.



Figura 2.16 - Desenvolvimento de bolores [24]

### **Degradação de revestimentos**

A presença de humidade na construção é o maior inimigo para os materiais que constituem os edifícios. Neste caso, as condensações na envolvente podem dar origem à degradação dos revestimentos interiores, podendo alterar as suas propriedades físicas (se as condensações forem internas), nomeadamente a condutibilidade térmica.

Conforme são os revestimentos interiores, os problemas variam. Os revestimentos de madeira ou cortiça podem apodrecer e em certos revestimentos ou pinturas o seu brilho altera-se e surgem manchas desagradáveis esteticamente.

## 2.6 Legislação

A Regulamentação Térmica é uma componente fundamental para a aplicação dos conceitos térmicos na construção de novos edifícios ou na reabilitação de edifícios já existentes. Apresenta-se, em seguida, uma breve evolução histórica sobre a regulamentação térmica em Portugal.

A 1 de Janeiro de 1991 entrou em vigor o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 40/90. Este foi o primeiro documento legal em Portugal que introduziu os aspectos térmicos e energéticos, definindo requisitos construtivos mínimos para a envolvente no projecto de novos edifícios e nas remodelações ou alterações em edifícios que representem metade do seu valor. O grande objectivo era garantir as exigências térmicas do interior dos edifícios sem dispêndio excessivo de energia e minimizar os efeitos patológicos nos elementos de construção derivados de condensações, estabelecendo coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis.

Quadro 2.4 - Valores máximos admissíveis apresentados no RCCTE de 1990 para U, em função da zona climática.

Envolvente Opaca		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Exterior	Coberturas	1,25	1,00	0,90
	Paredes	1,80	1,60	1,45

A nível europeu, esta primeira versão do RCCTE foi pioneira na introdução de requisitos mínimos ao nível do sombreamento para evitar sobreaquecimentos no Verão.

Antes da aprovação deste RCCTE, eram muito poucos os edifícios dotados de isolamento térmico e, como tal, este documento foi um marco histórico na melhoria da qualidade de construção em Portugal. Criou-se uma prática generalizada no uso de isolamento térmico, até mesmo onde o RCCTE não obrigava.

A 29 de Julho de 1992, surgiu o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) aprovado pelo Decreto-Lei nº 156/92. No entanto, em 1998, este regulamento foi revogado e substituído pelo Decreto-Lei nº 118/98.

### **2.6.1 Directivas Europeias**

A Directiva 89/106/CEE de 21 de Dezembro de 1988 tentou uma uniformização/aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas a todos os Estados-Membros relativamente aos produtos de construção, impondo também que a obra e as instalações de aquecimento, arrefecimento e ventilação sejam realizadas de modo a que a quantidade de energia necessária à sua utilização seja baixa (tendo em conta as condições climáticas do local e os ocupantes).

Em 13 de Setembro de 1993 surge a Directiva 93/76/CEE que limita as emissões de dióxido de carbono através do aumento da eficácia energética e impõe aos Estados-Membros que elaborem, apliquem e comuniquem problemas relativos à eficiência energética dos edifícios.

#### **Directiva 2002/91/CE relativa ao desempenho energético dos edifícios**

Ao longo dos anos os problemas foram analisados e, a 16 de Dezembro de 2002, surge a Directiva 2002/91/CE [25]. Além de promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios, esta Directiva estabelece requisitos mínimos para o desempenho energético de novos edifícios ou de edifícios existentes que sejam sujeitos a grandes obras de reabilitação, requer uma metodologia de cálculo do desempenho energético, impõe uma certificação energética dos edifícios e obriga a inspecções regulares de caldeiras e instalações de ar condicionado. A Directiva também obriga a uma contabilização das necessidades de energia para preparação das águas quentes sanitárias (num contexto em que todos os consumos de energia num edifício são importantes) para favorecer a introdução dos sistemas de colectores solares ou outras alternativas renováveis.

A Directiva 2002/91/CE veio forçar todos os Estados-Membros a uma actualização periódica dos regulamentos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios novos e reabilitados, obrigando-os a pôr em vigor as disposições legislativas, regulamentares e administrativas necessárias para que cumpram a directiva. De um modo geral, essas disposições foram:

- A aplicação de uma metodologia, nacional ou regional, para o cálculo do desempenho energético dos edifícios, com base no enquadramento geral estabelecido no anexo dessa mesma publicação;
- O estabelecimento dos requisitos mínimos em matéria de desempenho energético, tendo em conta as condições de clima interior, as particularidades locais, a utilização a que se destina o edifício e a sua idade;
- A distinção entre edifícios novos, edifícios existentes e diferentes categorias de edifícios, com particular atenção para os edifícios com uma área útil superior a 1000 m<sup>2</sup>;
- A elaboração de um Certificado de Desempenho Energético que inclua valores de referência para que os consumidores possam avaliar o desempenho energético do edifício, com uma validade de 10 anos. No caso de ser um edifício com uma área útil superior a 1000 m<sup>2</sup> ocupado por autoridades públicas e instituições que prestem serviços públicos, o certificado deve ser afixado, claramente visível;
- As inspecções de caldeiras e dos sistemas de ar condicionado deve ser feita de forma independente por peritos qualificados.

Para apoiar os 27 países da UE, em conjunto com a Noruega e a Croácia, na tarefa de introduzirem e implementarem a Directiva nas novas regulamentações térmicas nacionais, a Comissão Europeia lançou uma “Concerted Action EPBD” para promover o diálogo e as boas práticas entre eles, tentando que os países cheguem a estratégias comuns para a aplicação mais eficaz da legislação da UE. Esta “Concerted Action EPBD” foi realizada sob a coordenação da ADENE e prolongou-se de 2007 a 2010 [26].

A “Concerted Action EPBD” teve como principais temas de discussão a certificação dos edifícios, a inspecção a caldeiras e aparelhos de ar condicionado, as exigências da formação dos peritos qualificados, os procedimentos para a caracterização do desempenho energético e as campanhas de informação.

### **2.6.2 Os novos Decretos-Lei**

Como resposta à Directiva 2002/91/CE, em Portugal foram, simultaneamente, aprovados os Decretos-Lei nº 78/2006, nº 79/2006 e nº 80/2006 de 4 de Abril, conhecidos como Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar interior nos Edifícios (SCE), Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), respectivamente.

O sucesso destes novos regulamentos está na sua utilização na fase de licenciamento, onde um perito devidamente qualificado garante que os projectos licenciados ou autorizados cumprem todos os requisitos regulamentares.

#### **Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar interior nos Edifícios (SCE) [27]**

Os vários objectivos definidos no SCE são a aplicação regulamentar das condições de eficiência energética, a utilização de energias renováveis, a garantia da qualidade do ar interior (de acordo com o RCCTE e o RSECE) e a identificação das medidas correctivas ou de melhoria de desempenho aplicáveis aos edifícios e aos respectivos sistemas energéticos. Além dos objectivos mencionados anteriormente, há ainda a salientar o facto de o SCE certificar o “desempenho energético e a qualidade do ar interior” através de um processo de certificação energética conduzido por um perito qualificado.

Este processo de Certificação Energética é obrigatório para todos os novos edifícios ou aqueles que estejam sujeitos a grandes intervenções de reabilitação, para edifícios de serviços existentes que estejam sujeitos a auditorias periódicas e para edifícios existentes, de habitação ou de serviços, se forem alvo de contratos de venda ou aluguer. A Certificação Energética permite dar mais informações sobre a caracterização de um edifício, especialmente os consumos de energia e os respectivos custos energéticos durante o funcionamento normal do mesmo.

O Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE), aprovado em 2008 pelo Conselho de Ministros, propõe algumas metas relativas ao número de certificados

emitidos para os edifícios residenciais e para os edifícios de serviços. Com a aplicação do PNAEE, o número de certificados emitidos até ao fim de 2010 foi de, aproximadamente, 170000 para os edifícios residenciais e de 9400 para os edifícios de serviços. Até ao fim de 2015 as metas são mais ambiciosas, tentando-se alcançar os 475000 certificados para os edifícios residenciais e os 22700 certificados para os edifícios de serviços [28].

### **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [29]**

Ao longo dos últimos anos tem-se assistido a um crescimento acentuado na procura de sistemas de climatização no nosso país, desde os mais simples e de pequena dimensão (no sector residencial e dos pequenos serviços) aos sistemas complexos e de grandes dimensões (no sector terciário). O nível de vida das populações, o maior grau de exigência de conforto dentro dos edifícios e a “elevada taxa de crescimento do parque construído” foram os principais responsáveis por este aumento. Na altura da elaboração deste Decreto-Lei, o sector dos edifícios tinha a taxa de crescimento de consumo de energia mais elevada, entre todos os sectores da economia nacional, de 12% por ano.

O RSECE é mais orientado para os edifícios de serviços, actuando ao nível dos edifícios com climatização e com consumos de energia elevados, moderando-os e melhorando a qualidade dos sistemas energéticos nesses edifícios. Para além disso, o novo RSECE aumenta as exigências ao nível do dimensionamento, manutenção e funcionamento dos equipamentos e das auditorias à qualidade do ar interior em edifícios climatizados. Tal como o SCE, também neste regulamento é necessário que um perito qualificado verifique o cumprimento dos requisitos impostos.

Assim, os principais objectivos do novo RSECE são:

- Definir os requisitos exigências de conforto térmico e de higiene nos diferentes espaços dos edifícios (conforme as respectivas funções);
- Melhorar a eficiência energética global dos edifícios em todos os tipos de consumos energéticos existentes, limitando esse consumo para valores aceitáveis em todos os tipos de edifícios (existentes ou novos e em acções de reabilitação);
- Impor regras de eficiência aos sistemas de climatização que permitam um bom desempenho energético e a manutenção de uma boa qualidade do ar interior;

- Monitorizar com regularidade as práticas da manutenção dos sistemas de climatização para que haja um bom desempenho energético e uma boa qualidade do ar interior dos edifícios.

## **Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [16]**

A revisão do RCCTE introduziu requisitos mais exigentes na qualidade térmica da envolvente, nomeadamente duplicando os requisitos de isolamento térmico de referência, introduzindo critérios mais exigentes para as pontes térmicas e aumentando a exigência dos requisitos de protecção solar dos envidraçados.

Quadro 2.5 - Valores de referência apresentados no RCCTE de 1990 para U, em função da zona climática.

Envolvente Opaca		Zona Climática		
		I1	I2	I3
Exterior	Coberturas	1,10	0,85	0,75
	Paredes	1,40	1,20	0,95

Quadro 2.6 - Valores de referência apresentados no RCCTE de 2006 para U, em função da zona climática.

Envolvente Opaca		Zona Climática			
		I1	I2	I3	Regiões Autónomas
Exterior	Coberturas	0,50	0,45	0,40	0,80
	Paredes	0,70	0,60	0,50	1,40

Define, também, as condições ambientais de referência em termos de temperatura ambiente (20 °C no Inverno e 25 °C no Verão), inclui novas exigências no que se refere à qualidade e renovação do ar interior (0,6 h<sup>-1</sup> no caso de o edifício cumprir a NP 1037-1, para garantir as condições mínimas de ventilação) e para as necessidades de preparação das águas quentes sanitárias.

Assim, os principais objectivos do novo RCCTE são:

- Garantir as exigências de conforto térmico (seja no Inverno ou no Verão);
- Permitir que, através de uma boa ventilação, a qualidade do ar interior se mantenha a níveis aceitáveis;
- Optimizar o excessivo gasto energético no aquecimento das águas quentes sanitárias (recorrendo às energias renováveis, principalmente a colectores solares com uma dimensão obrigatória de  $1 \text{ m}^2$  por ocupante ou até 50% de ocupação da cobertura desde que o edifício possua uma exposição solar adequada, ou seja, desde que as coberturas orientadas numa gama de azimutes de  $90^\circ$  entre Sudeste e Sudoeste não sejam sombreadas no período de maior insolação, período esse que se considera iniciar duas horas depois do nascer do Sol e terminar duas horas antes do por do Sol);
- Minimizar a ocorrência de condensações superficiais ou internas, tentando que não existam situações patológicas nos elementos de construção que ponham em causa a sua durabilidade e a qualidade do ar interior.

O novo RCCTE destina-se “a cada uma das fracções autónomas de todos os novos edifícios de habitação” apenas aos espaços para os quais se requerem normalmente condições de conforto, a “todos os novos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados, independentemente de serem ou não, nos termos de legislação específica, sujeitos a licenciamento no território nacional”, às “grandes intervenções de remodelação ou de alteração na envolvente ou nas instalações de preparação de águas quentes sanitárias dos edifícios de habitação e dos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados já existentes” cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício e às “ampliações de edifícios existentes, exclusivamente na nova área construída”. Saem fora do âmbito de aplicação deste regulamento os edifícios ou fracções autónomas destinados a serviços que estejam frequentemente abertos ao contacto com o exterior e não sejam climatizados, os edifícios utilizados como locais de culto ou edifícios industriais e as intervenções em zonas históricas ou em edifícios classificados.

Este regulamento baseia-se numa metodologia de cálculo de valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ ), das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento ( $N_{vc}$ ), das necessidades nominais anuais de energia para produção de águas quentes sanitárias ( $N_{ac}$ ) e as necessidades globais de energia primária ( $N_{tc}$ ).



Posteriormente, estes índices são comparados com os valores máximos admissíveis de cada uma das necessidades ( $N_i$ ,  $N_v$ ,  $N_a$  e  $N_t$ ), tendo os primeiros que ser menores.

### **2.6.3 Regulamentação em alguns países europeus – tratamento das pontes térmicas**

Tal como referido no capítulo 2.6.1, a “Concerted Action EPBD” tem ajudado os Estados Membros a adaptarem-se às novas exigências da UE. A União Europeia, através da Directiva 2002/91/CE, impôs uma série de requisitos de modo a melhorar a eficiência energética de um edifício e, no que importa para este trabalho, ficam algumas das abordagens relacionadas com as pontes térmicas que alguns países adoptaram:

- Dinamarca

Nos regulamentos nacionais é considerada a influência das pontes térmicas nos novos edifícios e na reabilitação de edifícios. Todas as soluções típicas de pontes térmicas estão cobertas por valores tabelados disponíveis nas normas ou fornecidos pelos produtores dos materiais. A regulamentação térmica na Dinamarca contém requisitos mais rigorosos para as pontes térmicas para um edifício existente do que para os edifícios novos. Para os novos edifícios os valores máximos do coeficiente de transmissão térmica linear vão desde os 0,06 W/mK para as zonas das janelas até aos 0,40 W/mK para as ligações com o solo.

A realização dos pormenores construtivos é supervisionada pelas autoridades públicas durante o projecto e revistos por um perito qualificado durante a execução do edifício [30].

- Noruega

É feita uma distinção entre pontes térmicas de pouca importância e de maior importância, mas ambas entram no cálculo do desempenho energético quer seja para edifícios novos ou edifícios a reabilitar.

Há duas maneiras de cumprir os requisitos energéticos mínimos de um edifício: fixando um nível máximo de desempenho energético de um edifício inteiro (neste caso não há requisito específico relacionado com as pontes térmicas) ou adoptando um modelo de energia medida em que é calculado o valor da ponte térmica normalizado (NKV).

$$NKV = \frac{(\sum \psi \cdot l)}{A} \quad (16)$$

Onde,  $\psi$  é o coeficiente de transmissão térmica linear,  $l$  é o comprimento da ponte térmica e  $A$  é a área medida pelo interior.

Os valores máximos de  $U$  para as paredes, tectos e pisos são de 0,18, 0,13 e 0,15 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente. A execução dos pormenores não é verificada pelos peritos qualificados [30].

- Finlândia

As pontes térmicas só são consideradas para a construção de novos edifícios.

Existem dois métodos simplificados dependentes da relação entre a maior e a menor condutibilidade térmica de duas camadas adjacentes da envolvente. Se o valor da relação for menor do que 5, então este tipo de solução é tratada como uma média dos dois materiais no cálculo do  $U$ . Se o valor da relação for maior que 5, a zona deve ser tratada como uma ponte térmica.

A regulamentação finlandesa não impõe valores máximos para as pontes térmicas, apenas obriga a que os edifícios novos sejam concebidos de modo a que o coeficiente global de transferência de calor seja inferior ao do projecto.

Os pormenores construtivos são executados mas não são controlados pelos peritos qualificados, apenas dão orientações de uma boa prática [30].

Os métodos de cálculo da temperatura superficial interior não estão incluídos em nenhuma regulamentação finlandesa, mas o valor recomendado para a temperatura

superficial interior, para que se evite o risco de condensações, é de 10°C (é baseado nos valores da temperatura interior de 21°C e numa humidade relativa interior de 45%) [31].

- Reino Unido

O cálculo dos valores de  $\psi$  tem como base a EN ISO 10211-1.

Para evitar as condensações superficiais, o valor de  $f_{Rsi}$  para edifícios residenciais tem que ser superior a 0,75, para escolas ou oficinas superior a 0,50 e para cozinhas ou ginásios superior a 0,80 [31].

- Bélgica

Cada uma das três regiões da Bélgica é responsável pela implementação dos requisitos da EPBD no seu próprio território. Desde 2006 que têm vindo a introduzir progressivamente as suas próprias regulamentações, mas até à Primavera de 2010 as pontes térmicas ainda não tinham sido incluídas nos procedimentos de cálculo do desempenho energético em qualquer das regiões [32].

Ainda assim, já é obrigatório o certificado de desempenho energético para todos os novos edifícios.

No que respeita à temperatura superficial interior, o valor de  $R_{si}$  é 0,20 m<sup>2</sup>K/W e o risco de condensações é baseado no factor de temperatura superficial  $f_{0,2}$ . Para evitar o risco de condensações  $f_{0,2} \geq 0,7$  [31].

- Holanda

A influência das pontes térmicas apenas é considerada na construção de novos edifícios. O cálculo pode ser feito através de um método detalhado ou através de um método simplificado.

A realização dos pormenores construtivos é controlada pelos peritos qualificados, mas não há verificação na fase de construção [30].

O cálculo das temperaturas superficiais interiores dependem da localização da ponte térmica, isto é, se estiver 1,5m acima do nível do solo o valor de  $R_{si}$  é 0,25 m<sup>2</sup>K/W, se estiver 1,5m abaixo do nível do solo o valor de  $R_{si}$  é 0,50 m<sup>2</sup>K/W e para as pontes térmicas pontuais (intersecção de duas paredes exteriores e uma laje exterior) o valor de  $R_{si}$  é 0,25 m<sup>2</sup>K/W [31].

- Alemanha

As pontes térmicas são consideradas tanto para edifícios novos como para a reabilitação de edifícios e, em ambos os casos, aplicam-se métodos de cálculo detalhados e métodos simplificados. As normas nacionais impõem que o impacto das pontes térmicas deve ser o mais baixo possível.

A influência das pontes térmicas pode ser contabilizada de duas maneiras: aumentando a transferência de calor da área de superfície do edifício com  $\Delta U$  na ordem de 0,05 W/m<sup>2</sup>K se os pormenores construtivos estiverem tão bons como estão na norma alemã, de 0,10 W/m<sup>2</sup>K como valor padrão para os novos edifícios e de 0,15 W/m<sup>2</sup>K para edifícios existentes com isolamento pelo interior; ou uma análise precisa das pontes térmicas conforme é descrita na norma europeia EN ISO 10211-1/2.

O factor de temperatura superficial interior ( $f_{Rsi}$ ) deve ser maior que 0,7. A execução dos pormenores construtivos não é controlada pelas autoridades públicas nem pelos peritos qualificados [30].

- França

As normas nacionais apenas consideram a influência das pontes térmicas na execução de novos edifícios. São usados métodos de cálculo detalhados ou catálogos de pontes térmicas para calcular o valor do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ). Os métodos utilizados são baseados nas normas europeias EN ISO 10211, EN ISO 13370 e EN ISO 6946. O coeficiente de transmissão térmica linear não pode

exceder o valor de 0,65 W/mK para residências, de 1 W/mK para prédios de apartamentos e de 1,2 W/mK para os outros edifícios [30].

A execução dos pormenores construtivos não é controlada pelos peritos qualificados.

O risco de condensações está directamente relacionado com a humidade absoluta (HA) e, segundo [20], os valores do factor de temperatura superficial são:

- $f_{Rsi} > 0,25$  para valores da HA  $< 2,5 \text{ g/cm}^3$ ;
- $f_{Rsi} > 0,52$  para valores da HA entre  $2,5 \text{ g/cm}^3$  e  $5 \text{ g/cm}^3$ ;
- $f_{Rsi} > 0,73$  para valores da HA entre  $5 \text{ g/cm}^3$  e  $7,5 \text{ g/cm}^3$ .

- Polónia

A regulamentação considera a influência das pontes térmicas na construção de edifícios novos e na reabilitação de edifícios através de métodos de cálculo detalhados ou métodos simplificados.

No método simplificado o valor de U é corrigido, adicionando  $\Delta U = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  para paredes exteriores com aberturas de portas e janelas ou  $\Delta U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  para paredes exteriores com aberturas de portas e janelas com varanda que atravessa a parede. No método detalhado ou explícito são seguidos os procedimentos de acordo com a EN ISO 14683.

Os pormenores construtivos são revistos por outro desenhador e ambos são responsáveis pelas correcções a efectuar. Antes de ser ocupado, o edifício é verificado pelos responsáveis que se baseiam nos documentos formais existentes, sem fazerem verdadeiros testes ao edifício [30].

A temperatura superficial interior mínima para que não haja condensações superficiais deve ser pelo menos  $1^\circ\text{C}$  acima da temperatura do ponto de orvalho. Para o cálculo desta temperatura, deve-se tomar o valor de  $R_{si} = 0,167 \text{ m}^2\text{K/W}$  [31].

- República Checa

A regulamentação considera a influência das pontes térmicas na construção de edifícios novos e na reabilitação de edifícios através de métodos de cálculo detalhados ou de métodos simplificados.

Os métodos de cálculo são descritos nas normas europeias EN ISO 10211, EN ISO 14683 e EN ISO 13370.

Os diferentes valores do coeficiente de transmissão térmica linear variam entre os 0,10 e os 0,60 W/mK (valores obrigatórios) mas é recomendado que esses valores variem entre 0,05 e 0,20 W/mK. No caso de ser uma ponte térmica pontual (vértice de união entre três elementos planos, por exemplo quando há a junção de duas paredes verticais e uma laje horizontal) o valor obrigatório é de 0,90 W/K mas o valor recomendado é de 0,30 W/K.

Em casos especiais, o edifício é analisado pelas autoridades através de termografia infravermelha [30].

- Grécia

Até ao momento a Grécia ainda não inclui as pontes térmicas no seu método de cálculo, para nenhum tipo de edifícios [30].

- Espanha

A regulamentação considera a influência das pontes térmicas na construção de edifícios novos e na reabilitação de edifícios através de métodos de cálculo detalhados ou de métodos simplificados.

O método mais simples consiste num acréscimo no valor de U, para que não haja risco de existir uma ponte térmica nem risco de condensações superficiais. O método geral consiste na avaliação do coeficiente de transmissão térmica linear ( $\psi$ ) e da temperatura superficial interior, usando um software como o KOBRA (programa de análise numérica).

Quando os pormenores construtivos não estão incluídos no catálogo, o cálculo do seu coeficiente de transmissão térmica linear e a sua temperatura superficial interior devem ser incluídos no projecto. As normas não definem um valor máximo para o coeficiente de transmissão térmica linear, nem há um valor mínimo da temperatura superficial interior a evitar riscos de condensação superficial [30].

No entanto, as normas espanholas definem valores máximos para os coeficientes de transmissão térmica que variam entre os 0,46 e os 1,22 W/m<sup>2</sup>.°C conforme os elementos da envolvente e dependentes das zonas definidas de A a E. O factor de temperatura superficial mínimo também é definido nesta regulamentação, dependendo da localização do edifício e da classe higrotérmica do mesmo. Os valores mínimos variam entre os 0,50 para uma classe de higrometria 3 ou menor que 3, para a zona A, e os 0,90 para uma classe de higrometria 5, para a zona E [33].

- Itália

A influência das pontes térmicas apenas é considerada na construção de novos edifícios, aplicando os métodos de cálculo detalhados e os métodos simplificados.

O método detalhado segue os procedimentos da EN ISO 10211-1/2, enquanto o método simplificado acrescenta ao valor U um incremento de acordo com o tipo de parede e baseado na EN ISO 14683.

A regulamentação italiana não impõe um valor máximo para as zonas de pontes térmicas. Uma ponte térmica é considerada aceitável quando o seu valor U (calculado considerando como uma parede fictícia) não excede em mais de 15% a transmissão térmica da parede mais próxima, podendo, neste caso, ser ignorada. Por outro lado, se ultrapassar esse valor, faz-se uma média ponderada entre a transmissão térmica da parede e da ponte térmica (considerada na parede fictícia) e o valor é comparado com os valores máximos aceitáveis para a transmissão da parede.

Durante o projecto, os desenhadore s têm que apresentar um relatório às autoridades que inclua as características da envolvente. O controlo durante a execução da obra está previsto mas cada zona tem o seu procedimento [30].

Os valores de  $f_{Rsi}$  são calculados usando a EN ISO 13788 [31].

Em toda a Europa existem várias formas de encarar o problema das pontes térmicas (ver figura 2.17), dependendo também da localização e das temperaturas habituais em cada país. Como vimos em cima, o valor do coeficiente de transmissão térmica linear pode depender do tipo de ponte térmica (Dinamarca, República Checa ou Portugal) ou do tipo de edifício (França). A maioria dos países utiliza o factor de temperatura superficial ( $f_{Rsi}$ ) para verificar se existe risco de condensações superficiais nas zonas mais problemáticas da envolvente, nas zonas de pontes térmicas.

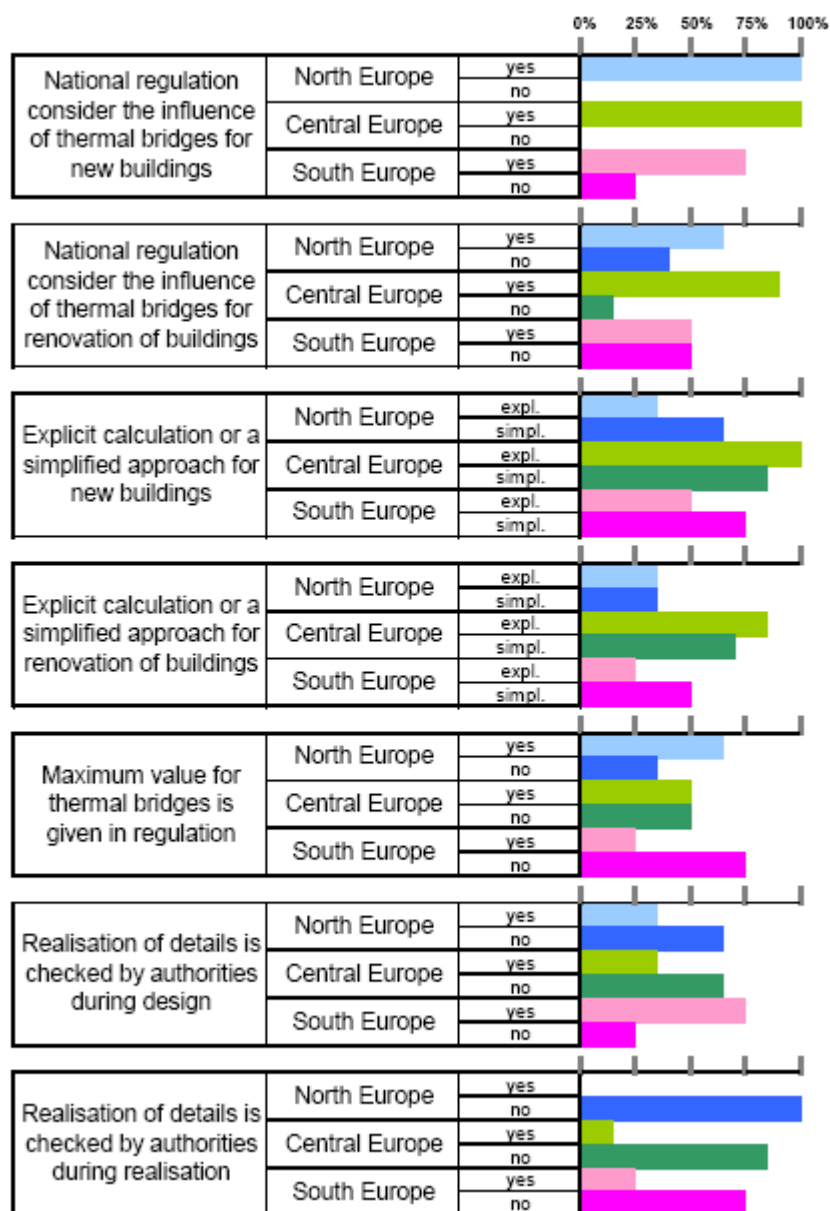


Figura 2.17– As ações dos países europeus relativamente às pontes térmicas [30]



#### **2.6.4 Normas Europeias**

São inúmeras as normas europeias relacionadas com a térmica dos edifícios, mas, relativamente às pontes térmicas e aos problemas que delas podem surgir, existem quatro que são fundamentais:

- EN ISO 10211: Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. (ISO 10211 – 2007) [20]
- EN ISO 6946: Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method. (ISO 6946 – 2007) [34]
- EN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods (ISO 13788 – 2001) [35]
- EN ISO 14683: Thermal bridges in building constructions. Linear thermal transmittance. Simplified methods and default values. (ISO 14683 – 2007) [36]

### **3 ANÁLISE EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Breve história da FCT-UNL**

Em Novembro de 1977, o Ministro da Educação, Professor Doutor Mário Sottomayor Cardia, dividiu a Universidade Nova de Lisboa em quatro unidades: Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Faculdade de Ciências Sociais e Humanas (FCSH), Faculdade de Economia (FE) e Faculdade de Ciências Médicas (FCM).

A partir do ano lectivo de 1977/78, iniciaram-se na FCT as licenciaturas em Engenharia de Produção Industrial (integrando os ramos de Engenharia Mecânica, Engenharia Química e Engenharia de Produção Industrial) e Engenharia do Ambiente (com os ramos de Ambiente e de Sanitária). Seguiram-se as licenciaturas em Matemática, Química Aplicada, Engenharia Geológica, Engenharia Física e dos Materiais e Engenharia Informática.

Em 1979, projectaram-se as infra-estruturas de suporte científico ao projecto pedagógico em execução, através dos departamentos de Matemática, Informática, Física, Química, Ambiente, Ciências da Terra, Ciência dos Materiais e Energia, Controlo e Produção Industrial.

##### **3.1.1 Evolução do Campus da FCT-UNL**

Os primeiros edifícios construídos no *campus* universitário (ver quadro 3.1) foram inaugurados pelo Presidente da República da altura, o General Ramalho Eanes, no dia 20 de Março de 1980. Durante dois anos, decorreram as mudanças das instalações provisórias, no espaço do Seminário dos Olivais, para os novos espaços no *Campus* Universitário da Caparica.

Desde o momento da mudança que o *campus* da Caparica tem estado sempre em expansão. Inicialmente, a FCT era constituída apenas por um edifício e três hangares e as condições de ensino não eram as melhores. Neste momento o *campus* é constituído por cerca de 20 edifícios, sendo o mais recente a Biblioteca. Até 1989 foram construídos os edifícios I, II, III, IV, V e VI, enquanto os edifícios VII, VIII, IX e X são mais recentes e foram construídos apenas a partir de 1998 (ver quadro 3.1). Há uma grande diferença temporal entre

a construção dos primeiros e destes últimos, por isso mesmo os edifícios mais recentes já foram construídos com alguma preocupação térmica.

Quadro 3.1 - Data de conclusão dos edifícios da FCT-UNL [37]

<b>Edifícios</b>	<b>Ano de conclusão</b>
Edifício I	1980
Hangares	1982
Edifício II	1983
Edifício III	1984
Edifício IV	1984
Grande Auditório (V)	1987
Cantina	1988
Edifício VI	1989
UniNova	1991
CeniMAT	1993
Centro de Excelência do Ambiente (CEA)	1994
Edifício Departamental	1993 (1ª fase)
	1996 (2ª fase)
	1997 (3ª fase)
CITI (Programa Ciência)	1994
Edifício VII	1998
Edifício VIII	1999
Edifício IX	1999
Edifício X	2000
Biblioteca Geral	2005

## 3.2 Termografia no campo da Engenharia Civil

### 3.2.1 Os raios infravermelhos

Foi em 1800 que Sir Frederick William Herschel, na tentativa de descobrir quais as cores do espectro electromagnético que eram responsáveis pelo aquecimento dos objectos, descobriu os raios infravermelhos. Verificou que a temperatura aumentava à medida que se passava do violeta até ao vermelho e que essa temperatura era maior para além do vermelho.

Após a observação destes resultados e de outras experiências, concluiu que as radiações que se situavam para além da luz vermelha, na zona invisível ao olho humano, eram as responsáveis pelo aquecimento dos objectos. Inicialmente foram designados por raios caloríficos, mas posteriormente foram denominados raios infravermelhos [38].

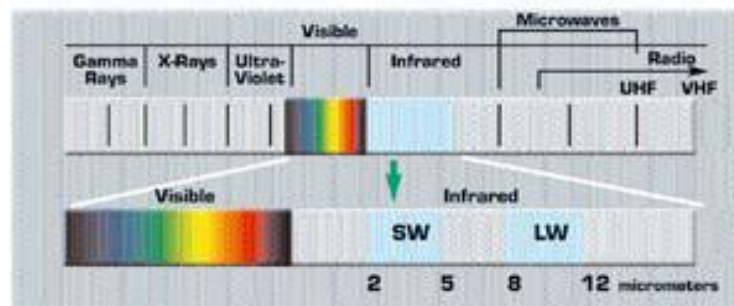


Figura 3.1 - Espectro electromagnético [39]

### 3.2.2 A termografia por infravermelhos e o equipamento de medição

Todos os objectos emitem radiação infravermelha, mas a intensidade dessa radiação depende da temperatura do objecto e da sua emissividade (capacidade do objecto emitir radiação). Todos os materiais com uma temperatura acima do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) emitem continuamente energia na região dos infravermelhos com diferentes intensidades e comprimentos de onda, em função da temperatura absoluta e das características da sua superfície. Quanto mais quente estiver o objecto, maior a radiação que emite.

A termografia é um método de determinação e representação da temperatura superficial de um corpo, por medição da radiação infravermelha emitida pela sua superfície. Os sistemas de termografia infravermelha captam essa radiação e convertem-na numa imagem que representa a distribuição da temperatura superficial do objecto observado. A energia emitida em forma de onda electromagnética é caracterizada por um determinado comprimento de onda e não se encontra distribuída igualmente por todos eles. De uma forma geral, a termografia por infravermelhos é uma técnica que transforma a radiação emitida pelos objectos numa imagem de temperaturas superficiais.

A figura 3.2 mostra que à medida que o corpo negro é aquecido, os picos de energia deslocam-se para comprimentos de onda menores.

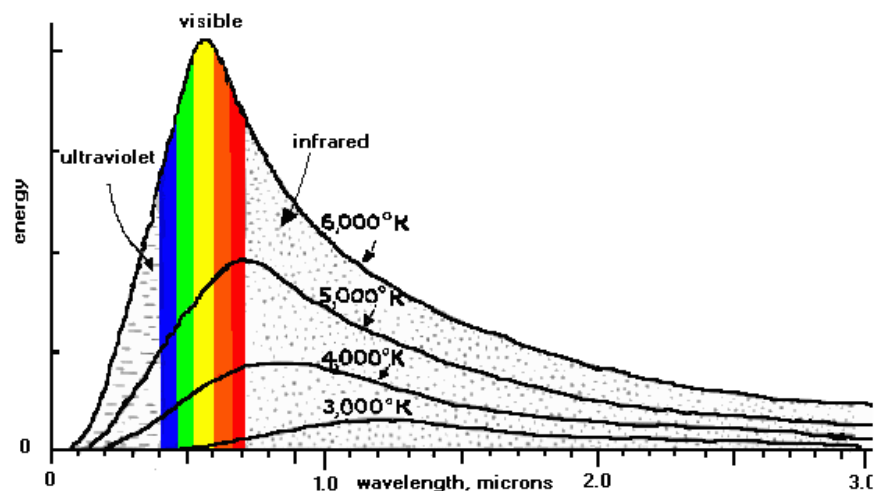


Figura 3.2 - Curva de Planck

Para além da engenharia civil, a termografia por infravermelhos pode ser utilizada em diversos campos como são os casos da medicina, da astronomia, do sector industrial (manutenção dos sistemas mecânicos ou dos sistemas eléctricos e controlo do processo de fabrico), da segurança e vigilância (fins militares, combate a incêndios, buscas e salvamentos, navegação e policiamento) e de outras aplicações (arqueologia, geologia, História, meteorologia ou oceanografia) [38].

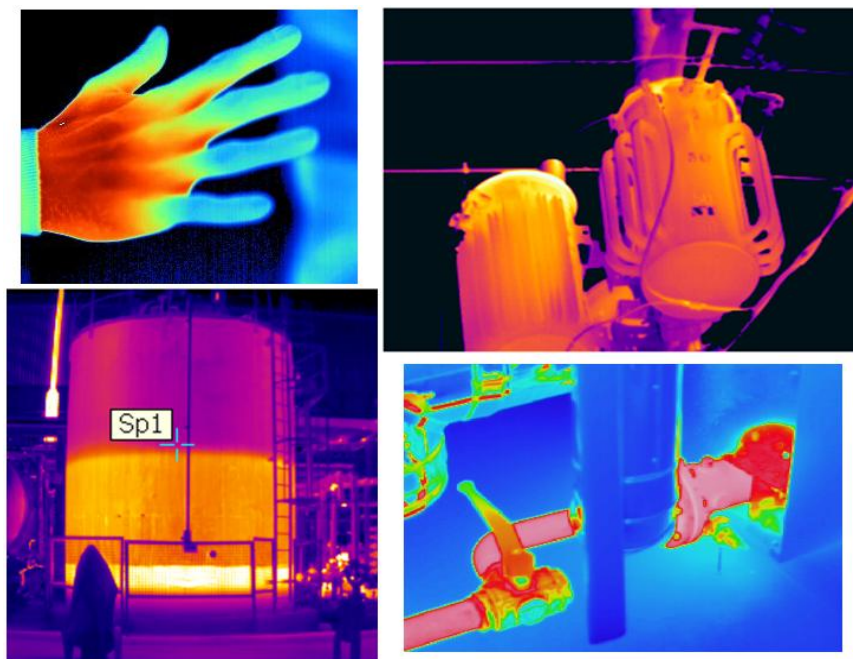


Figura 3.3 - Várias aplicações da termografia por infravermelhos

Para uma inspecção termográfica por infravermelhos é necessário utilizar uma câmara termográfica. Uma câmara termográfica é um aparelho que detecta calor (energia infravermelha), convertendo-o em sinal eléctrico de modo a produzir imagens com os valores da temperatura. Apesar de as câmaras medirem a radiação (calor), é possível converter esses valores em temperatura.

As câmaras termográficas possibilitam a representação de imagens térmicas com a distribuição das temperaturas de um objecto, segundo uma escala de cores à escolha. Assim, é possível conhecer com exactidão a temperatura num determinado ponto e efectuar vários tipos de análise sobre a própria imagem através da utilização do software auxiliar.



Figura 3.4 - Câmara termográfica “ThermaCAM B4” da FLIR Systems

A nova tecnologia utilizada nos detectores (componente principal das câmaras termográficas), a imagem visual integrada e o software disponível, permitem a realização de inspecções termográficas produtivas e precisas.

### **3.2.3 Aplicações da termografia nos edifícios**

Esta técnica pode ser utilizada na manutenção e reabilitação de edifícios porque permite a identificação de defeitos e a realização de estudos do desempenho térmico de elementos construtivos, além de poder detectar causas verificadas visualmente ou descobrir anomalias ainda não aparentes, mas já existentes.

A termografia de infravermelhos é uma ferramenta que permite ao dono de obra, à fiscalização e aos utilizadores efectuarem ensaios relativamente rápidos, económicos e não destrutivos, para verificar se o trabalho em obra foi executado conforme o projecto. No

entanto, em certos casos, pode ser necessário complementar o diagnóstico com outras técnicas de ensaio. Permite, também, detectar anomalias que se manifestam através de variações na temperatura superficial, localizando perdas de energia pela envolvente opaca ou pelas janelas resultantes do isolamento térmico deficiente ou fugas de ar, descobrindo zonas fissuradas nos elementos construtivos opacos, verificando revestimentos de fachadas e definindo pontes térmicas ou pontos de infiltração de humidade [38].

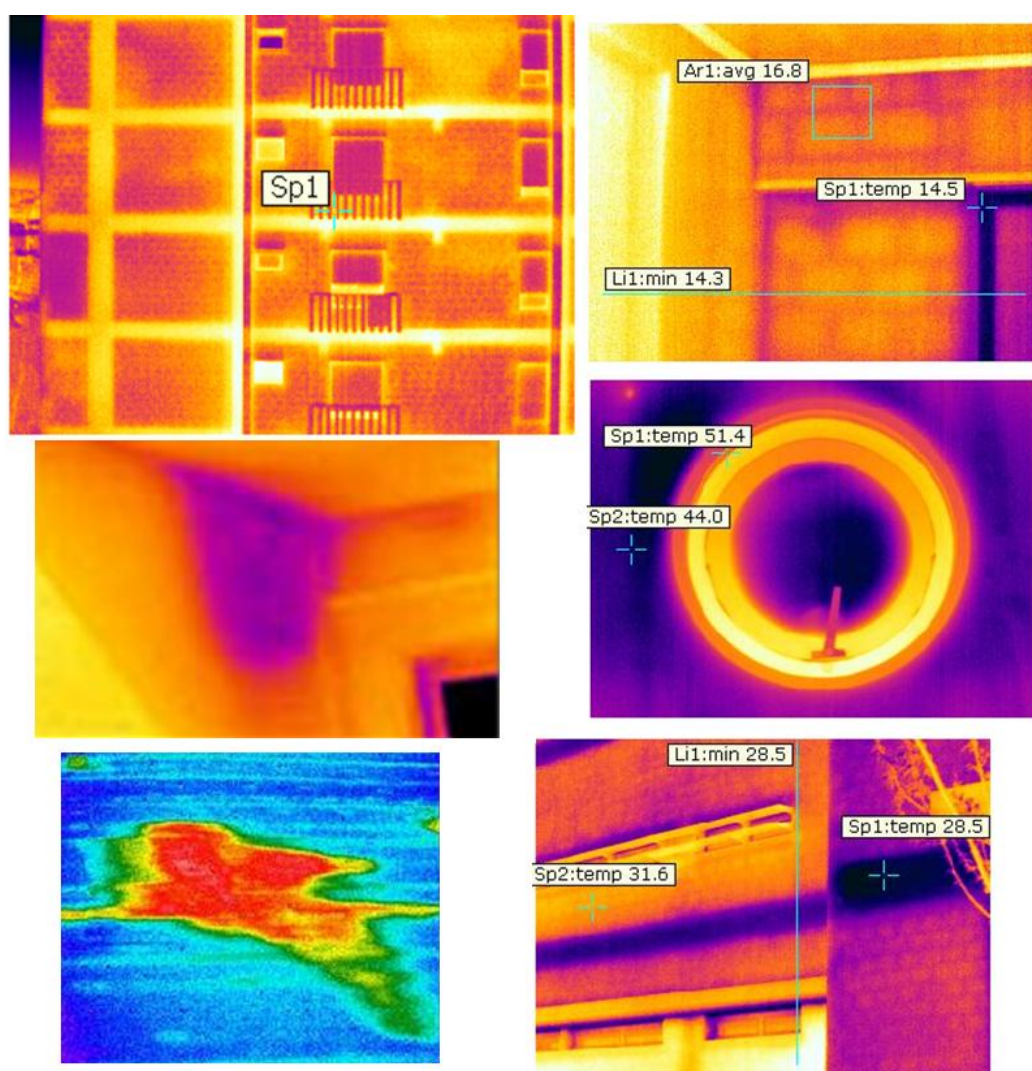


Figura 3.5 - Aplicações da termografia por infravermelhos nos edifícios

Muitos edifícios têm sido sujeitos a reparações para melhorar o seu comportamento térmico e otimizar o consumo de energia e, após a realização das obras, é possível,

recorrendo à termografia, inspeccionar os edifícios para medir a eficácia das opções adoptadas [38].

Alguns trabalhos neste campo consideram que a termografia infravermelha em edifícios permite comparar as perdas de calor entre vários edifícios diferentes, observando os termogramas, as zonas com falhas no isolamento térmico ou identificar as áreas onde a circulação do ar é menor. Este tipo de análise deve ser feita durante a noite para que se evite a incidência directa do sol, mas há investigadores que também analisam os edifícios ao amanhecer [40]. Através desta técnica, a manutenção dos edifícios fica facilitada porque é possível delimitar as áreas com problemas, reparando-as de uma forma mais eficaz e localizada.

Numa inspecção termográfica são produzidos termogramas e registadas as respectivas temperaturas ao longo da superfície. Depois da análise, recorrendo a um software apropriado para estudar os dados recolhidos, é possível tirar conclusões precisas e indicar as medidas correctivas ou preventivas adequadas a cada situação.

### **3.3 Descrição da Análise**

De acordo com a literatura, para efectuar uma análise experimental deste tipo é preciso tentar cumprir certos requisitos. De um modo geral, é necessário que a diferença entre a temperatura interior e exterior seja de 10°C pelo menos 8h antes da inspecção e que a variação da temperatura superficial seja inferior a 30% durante as 24 horas anteriores à inspecção [41].

Relativamente às inspecções interiores, tem que se verificar que a superfície a analisar não está directamente exposta ao sol (através de uma janela), que não há um aquecedor a funcionar perto da superfície, que não há cabos de electricidade no interior da parede e que a superfície não está húmida [41].

As inspecções exteriores têm mais condicionantes que as interiores porque são sujeitas a muitos factores ambientais que variam ao longo dos dias. Assim, o material termográfico utilizado deve permitir que a superfície analisada seja de pelo menos 6m<sup>2</sup>, devendo-se estar atento à natureza dos materiais da superfície observados, à orientação geográfica do edifício, aos elementos/outros edifícios em redor do edifício em estudo e às condições climáticas [41].



### 3.4 Metodologia de Trabalho

O desenvolvimento da análise experimental obedeceu a várias etapas:

1. Investigar as condicionantes. Inicialmente é necessário saber quais as restrições para que a análise experimental tenha sucesso, nomeadamente as diferenças de temperatura entre o exterior e o interior.
2. Aprender a trabalhar com o equipamento. Antes da análise, é importante saber trabalhar com a câmara termográfica para facilitar a focagem, a colocação dos pontos que se querem estudar e a mudança da escala das temperaturas.
3. Explorar o *campus* da FCT/UNL. É útil fazer um reconhecimento dos vários edifícios e perceber se é possível fazer a análise no interior e no exterior.
4. Esperar pelas condições climatéricas ideais. Por norma, as condições climatéricas na zona de Lisboa não são as ideais para este tipo de análise, mas é fundamental que as condições sejam minimamente aceitáveis.
5. Escolher os locais e fazer a análise experimental. Depois do ponto 3, são escolhidos os locais que se querem analisar e são tirados os termogramas do interior e do exterior, assim como registadas as temperaturas ambiente interior e exterior recorrendo a um termómetro digital.
6. Tratar dos termogramas com o software. É possível tratar dos termogramas no software auxiliar da câmara termográfica, modificando a escala das temperaturas, as respectivas cores ou alterar os pontos inicialmente analisados.
7. Analisar os termogramas e as diferenças de temperatura. Feitas todas as etapas anteriores, analisam-se os termogramas e as diferenças de temperatura no capítulo seguinte.

Optou-se por fazer o estudo de noite, para evitar a incidência directa do sol, e em dias em que a superfície exterior não estivesse húmida, já que a temperatura superficial iria ser menor. Utilizou-se o valor de 0,9 para a emissividade.

## 4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais com recurso à termografia. Optou-se por fazer uma análise em quatro edifícios com anos de conclusão distintos, em locais com diferentes tipos de utilização para se poderem obter valores diferentes, de modo a se poder comparar e tentar chegar a alguma conclusão relativamente ao tipo de ocupação ou ao tipo de construção.



Figura 4.1 - Planta da FCT-UNL com a identificação dos locais analisados

1. A primeira análise foi feita ao edifício VII na zona indicada na figura 4.2. O edifício VII é relativamente recente (concluído em 1998) e a análise recai sobre uma zona de escadas, uma zona não aquecida. Nestas zonas as temperaturas são mais baixas, as diferenças para o exterior são menores que nas zonas aquecidas (salas de aula, auditórios, salas de computadores, etc.) e não se consideram pontes térmicas já que a envolvente separa o exterior de um espaço não útil, não havendo grandes perdas térmicas. Ainda assim foi uma zona analisada por existirem manchas de infiltrações visíveis na superfície interior.

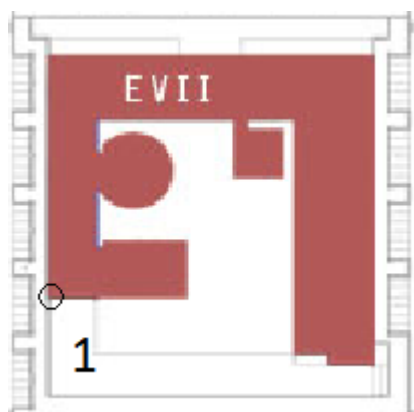


Figura 4.2 – Planta do edifício VII, localização da análise 1

Quadro 4.1 - Dados da análise experimental do local 1

Nº foto	Data	Hora	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	Localização
IR_223	11-01-2010	19:38	7,3	-	Exterior, Edifício VII, Fachada Sul
IR_227	11-01-2010	19:57	-	14,1	Interior, Edifício VII, Canto Sudoeste
IR_228	11-01-2010	20:05	-	14,1	Interior, Edifício VII, Canto Sudoeste

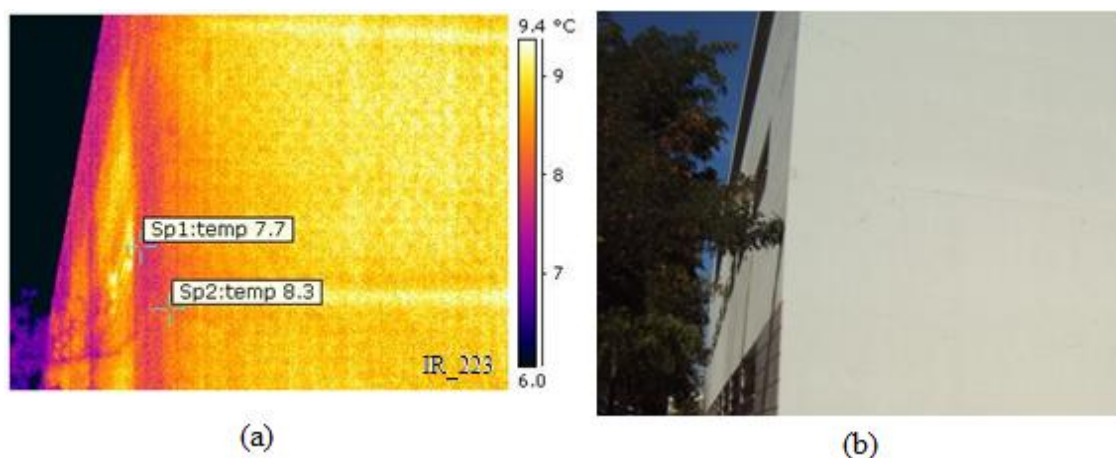


Figura 4.3 - (a) Imagem térmica IR\_223 da fachada Sul; (b) Imagem visual

Como mostramos termogramas, as diferenças de temperatura superficial entre o exterior e o interior da envolvente em zona corrente rondam os  $2/2,5^{\circ}\text{C}$ , enquanto as diferenças na zona do cunhal são de  $1,5^{\circ}\text{C}$  (ver figuras 4.3, 4.4 e 4.5).

A maior diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial mínima interior atinge os  $5^{\circ}\text{C}$  ( $14,1 - 9,1 = 5^{\circ}\text{C}$ ), enquanto a diferença entre a temperatura ambiente exterior e interior é de  $6,8^{\circ}\text{C}$  (ver dados do quadro 4.1).

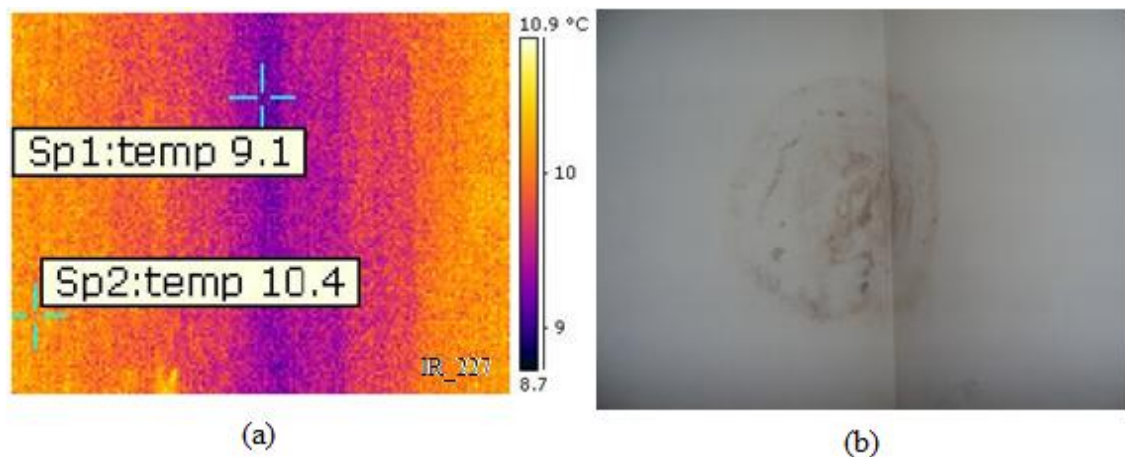


Figura 4.4 - (a) Imagem térmica IR\_227 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual

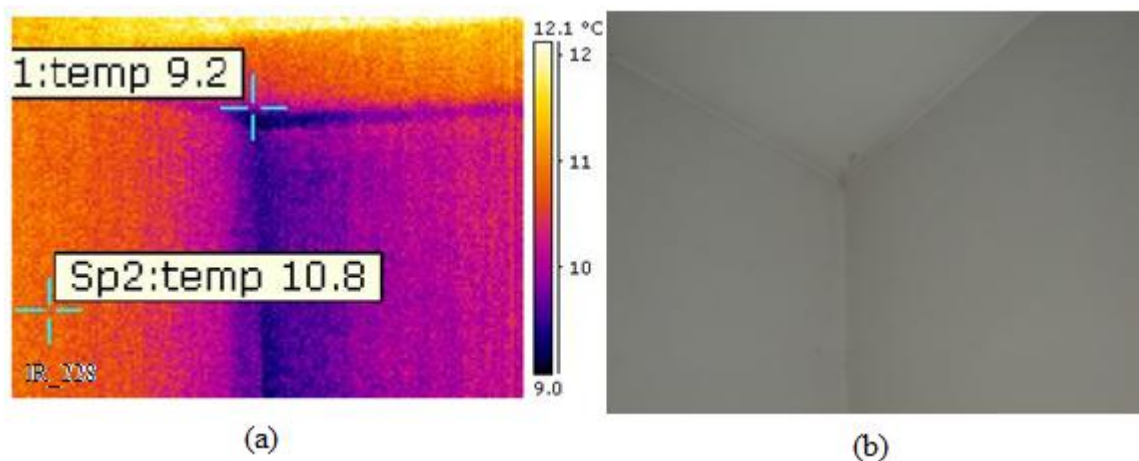


Figura 4.5 - (a) Imagem térmica IR\_228 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual

2. Análise feita ao Edifício IV (sala 111) na zona indicada na figura 4.6. O edifício IV é dos edifícios mais antigos da FCT (concluído em 1984) e a fachada analisada pertence a uma pequena sala de aula.

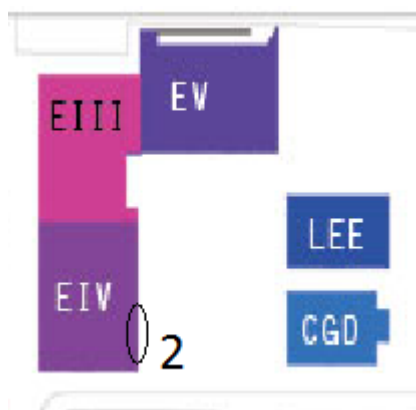


Figura 4.6 – Planta do edifício IV, localização da análise 2

Quadro 4.2 - Dados da análise experimental do local 2

Nº foto	Data	Hora	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	Localização
IR_235	02-02-2010	18:41	-	15,8	Interior, Edifício IV (sala 111), Canto Nordeste
IR_236	02-02-2010	18:42	-	15,8	Interior, Edifício IV (sala 111), Canto Noroeste
IR_237	02-02-2010	18:46	-	15,9	Interior, Edifício IV (sala 111), Fachada Este (pilar em zona corrente)
IR_238	02-02-2010	18:47	-	15,9	Interior, Edifício IV (sala 111), Fachada Este (pilar em zona corrente em contacto com o solo)
IR_243	02-02-2010	19:12	11,0	-	Exterior, Edifício IV (sala 111), Fachada Este
IR_244	02-02-2010	19:15	10,9	-	Exterior, Edifício IV (sala 111), Fachada Este (pilar em zona corrente)

Através da análise das figuras 4.9 (a) e 4.10 (a), há um pormenor que é importante salientar: o pilar que “provoca” a heterogeneidade inserida na envolvente tem, de forma descendente, um aumento de temperatura superficial interior. Se observarmos a imagem seguinte percebemos que a causa deste fenómeno poderá ser a diferença do tipo de revestimento exterior.

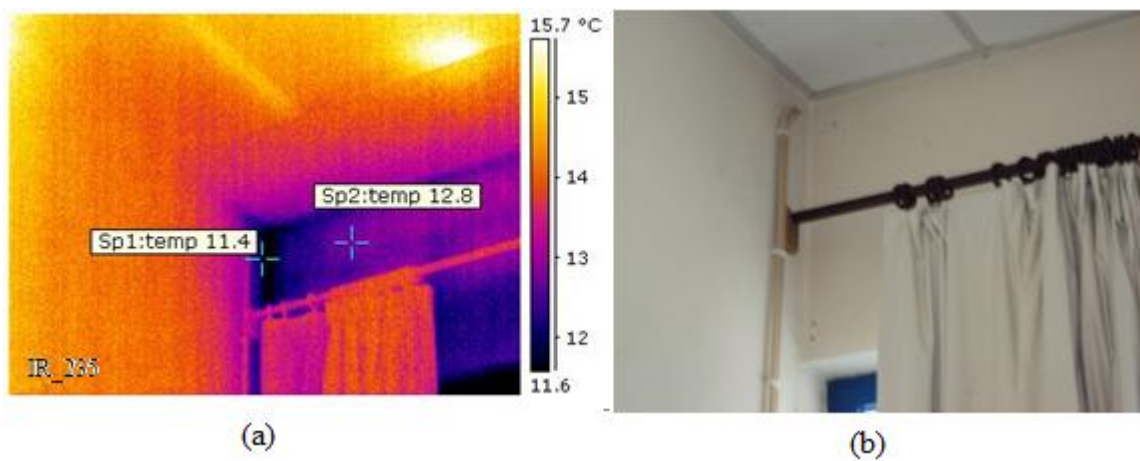


Figura 4.7 - (a) Imagem térmica IR\_235 do canto Nordeste; (b) Imagem visual

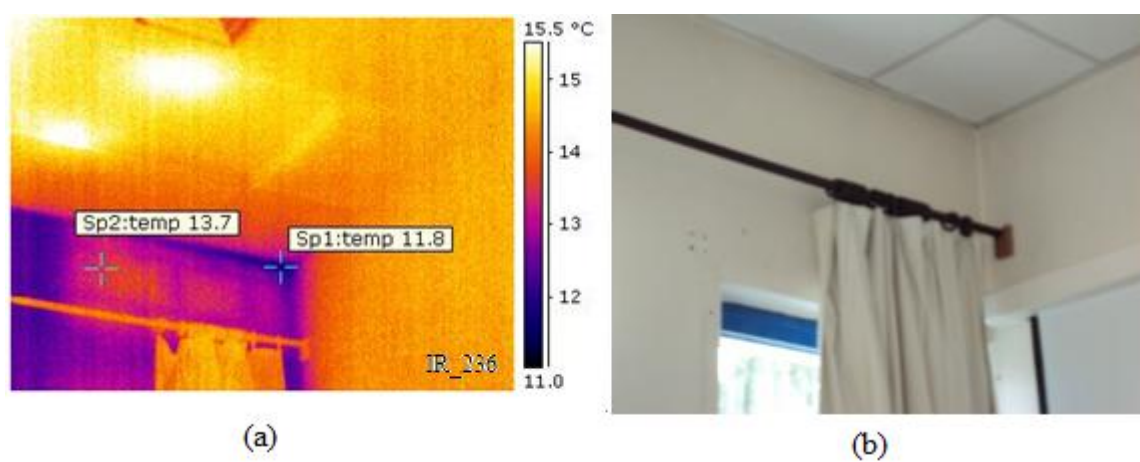


Figura 4.8 - (a) Imagem térmica IR\_236 do canto Sudeste; (b) Imagem visual

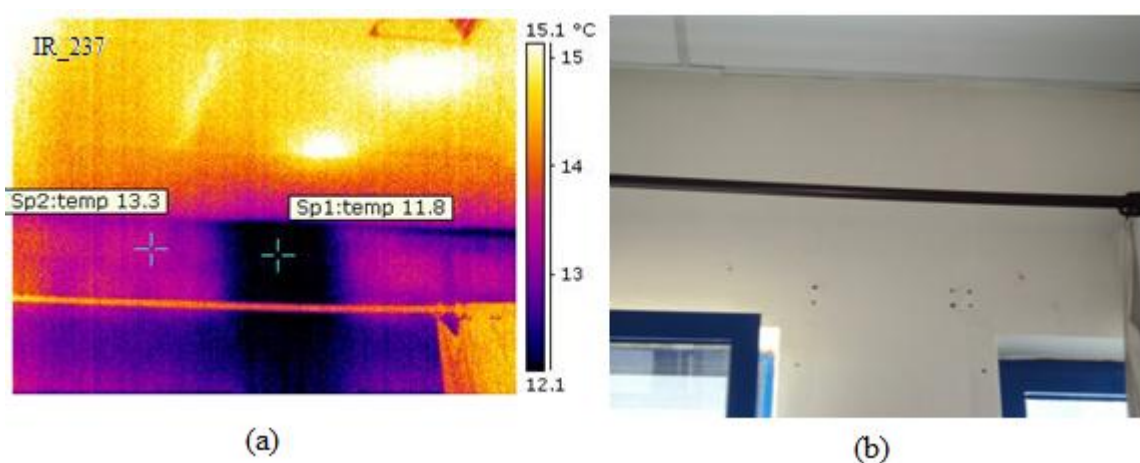


Figura 4.9 - (a) Imagem térmica IR\_237 da fachada Este; (b) Imagem visual



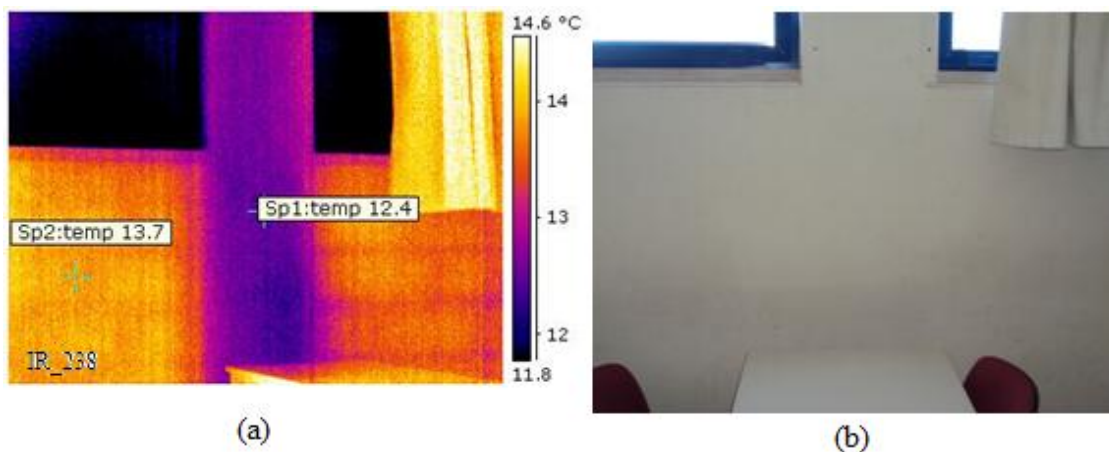


Figura 4.10 - (a) Imagem térmica IR\_238 da fachada Este; (b) Imagem visual

Do ponto de vista térmico, é importante que apenas se observe a zona superior (acima da janela) para não haver influência do revestimento exterior, tal como foi explicado anteriormente. Observa-se que as diferenças de temperatura superficial entre o exterior e o interior são de aproximadamente 5°C em zona corrente (ver figuras 4.9 e 4.11). No caso do pilar, as diferenças de temperatura superficial rondam os 4°C (ver figuras 4.9 e 4.12). Comparando as temperaturas superficiais num mesmo plano horizontal, pode-se verificar que as diferenças, no interior, entre a zona corrente e a zona do pilar atingem valores na ordem de 1,5/2°C (figuras 4.7, 4.8 e 4.9), enquanto no exterior as diferenças não ultrapassam os 0,6°C (figuras 4.11 e 4.12).

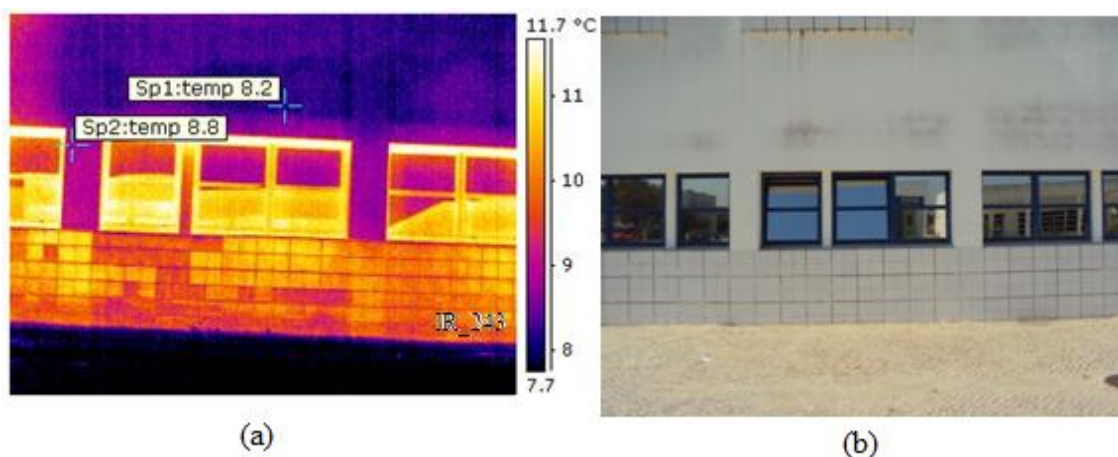


Figura 4.11 - (a) Imagem térmica IR\_243 da fachada Este; (b) Imagem visual

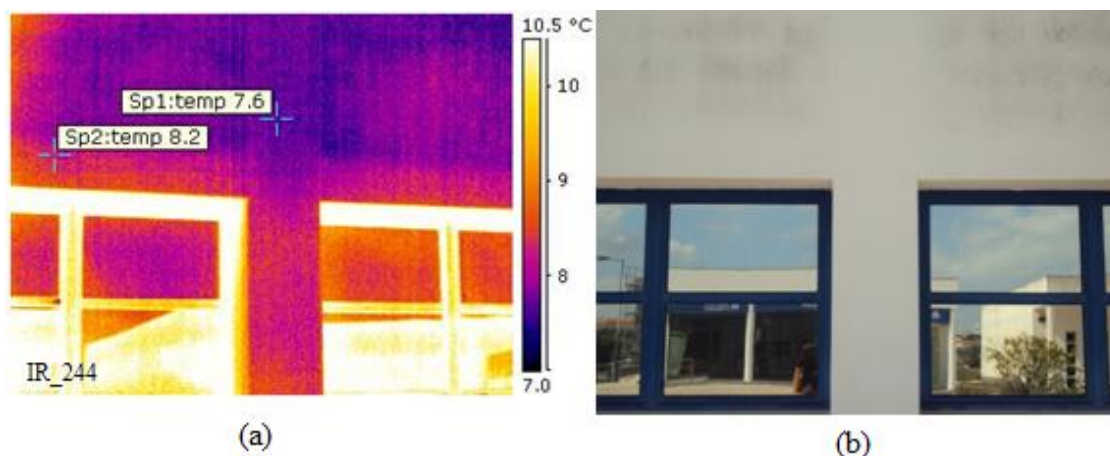


Figura 4.12 - (a) Imagem térmica IR\_244 da fachada Este; (b) Imagem visual

A maior diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial mínima interior atinge os 4,5°C ( $15,9 - 11,4 = 4,5$  °C), enquanto a diferença entre a temperatura ambiente exterior e interior é de 5°C (ver dados do quadro 4.2). Este é o valor mais baixo de todos os locais. Não é o valor desejável já que a diferença deveria ser mais próxima de 10°C, no entanto são os valores obtidos experimentalmente.

3. Análise ao edifício IV na zona indicada na figura 4.13. Tal como referido em cima, o edifício IV foi dos primeiros edifícios a serem construídos na FCT. Analisou-se a fachada Oeste da sala 202 no 2º piso. Optou-se por este local porque a fachada analisada tem um revestimento interior de madeira, o que é diferente e pouco habitual.

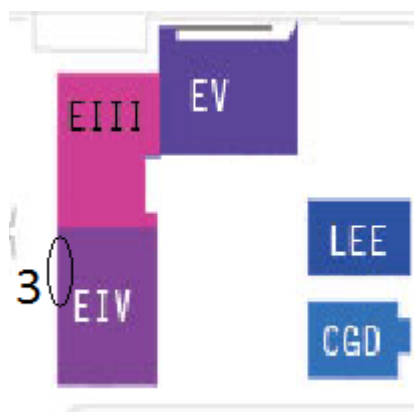


Figura 4.13 – Planta do edifício IV, localização da análise 3



Quadro 4.3 - Dados da análise experimental do local 3

Nº foto	Data	Hora	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	Localização
IR_229	02-02-2010	18:29	-	18,8	Interior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste (Canto Sudoeste)
IR_231	02-02-2010	18:31	-	18,9	Interior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste (Canto Noroeste)
IR_239	02-02-2010	18:55	10,6	-	Exterior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste
IR_240	02-02-2010	18:57	10,9	-	Exterior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste
IR_241	02-02-2010	19:02	10,9	-	Exterior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste
IR_242	02-02-2010	19:06	11,0	-	Exterior, Edifício IV (sala PRE), Fachada Oeste

A grande diferença deste local para os outros reside no revestimento interior em madeira. Consegue-se perceber que entre os painéis de madeira a temperatura é menor, ou seja, nas zonas onde o revestimento não é contínuo a temperatura superficial interior da envolvente é menor que a temperatura superficial dos painéis. É importante destacar que existem diferenças significativas entre o canto esquerdo e o canto direito da sala, observando-se que as temperaturas superficiais das três zonas indicadas são menores no canto direito. As diferenças podem ser vistas nas figuras 4.14 e 4.15 e são de, aproximadamente, 4°C ( $16,6 - 12,7 = 3,9$  °C) na zona dos cunhais, 3,5°C ( $19,3 - 15,6 = 3,7$  °C) na zona dos painéis e 2,5°C ( $17,2 - 14,8 = 2,4$  °C) na zona entre painéis.

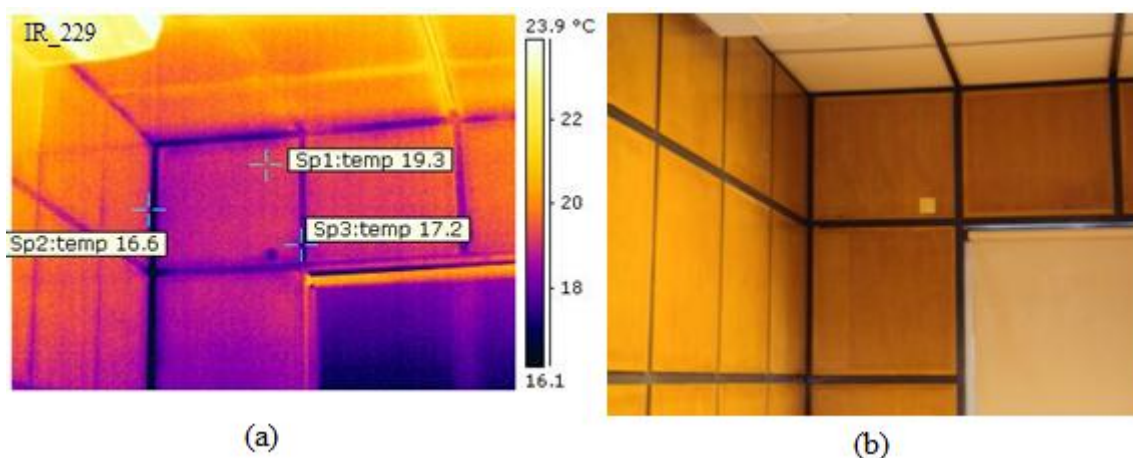


Figura 4.14 - (a) Imagem térmica IR\_229 do canto Sudoeste; (b) Imagem visual

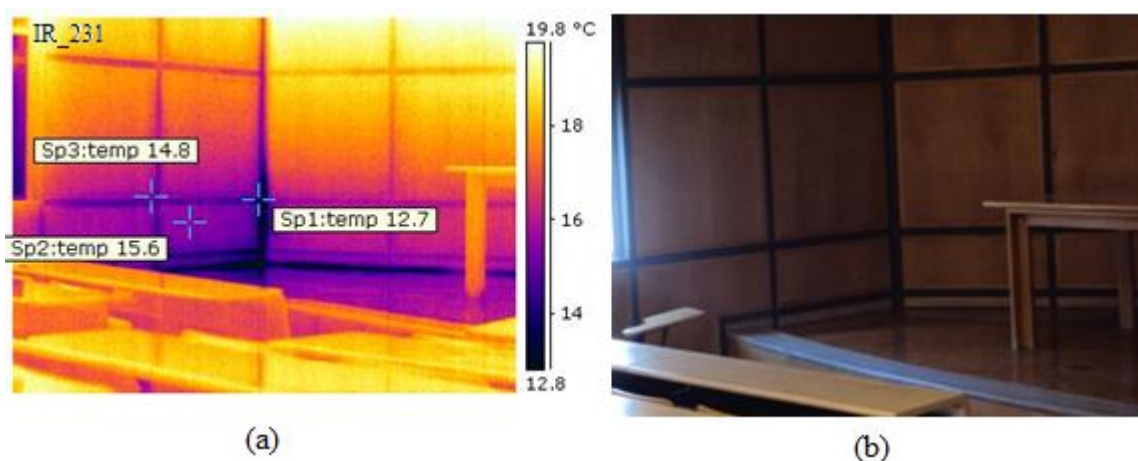


Figura 4.15 - (a) Imagem térmica do canto Noroeste; (b) Imagem visual

Neste tipo de revestimento interior, é ainda mais importante analisar o fenómeno das condensações superficiais porque a madeira, apesar de tratada, é um material que absorve água. Pode acontecer que, aparentemente, esse fenómeno não seja visível ao nível dos painéis de madeira mas pode-se manifestar por baixo dos mesmos. Nas zonas entre painéis a temperatura é menor, o que aponta para a ideia de que as temperaturas são mais baixas atrás do revestimento.

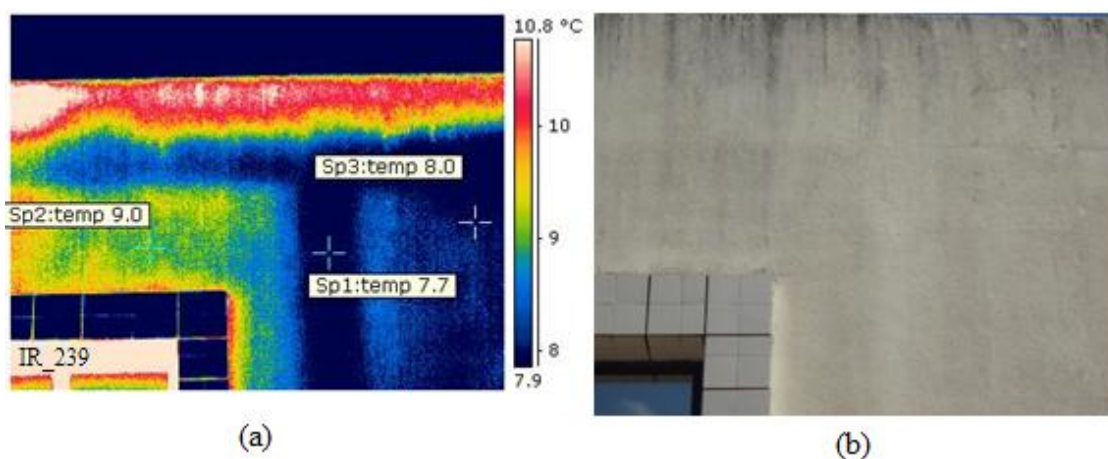


Figura 4.16 – (a) Imagem térmica IR\_239 da fachada Oeste; (b) Imagem visual

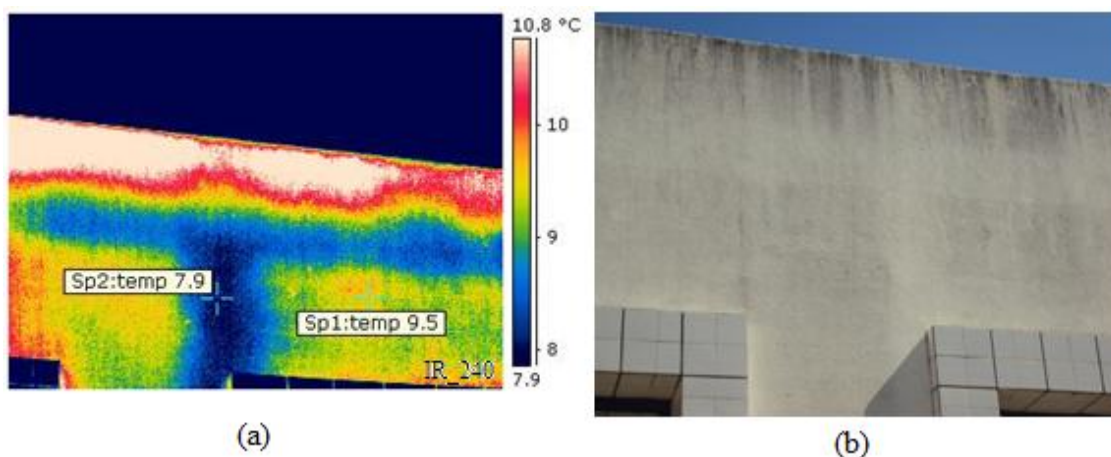


Figura 4.17 - (a) Imagem térmica IR\_240 da fachada Oeste; (b) Imagem visual

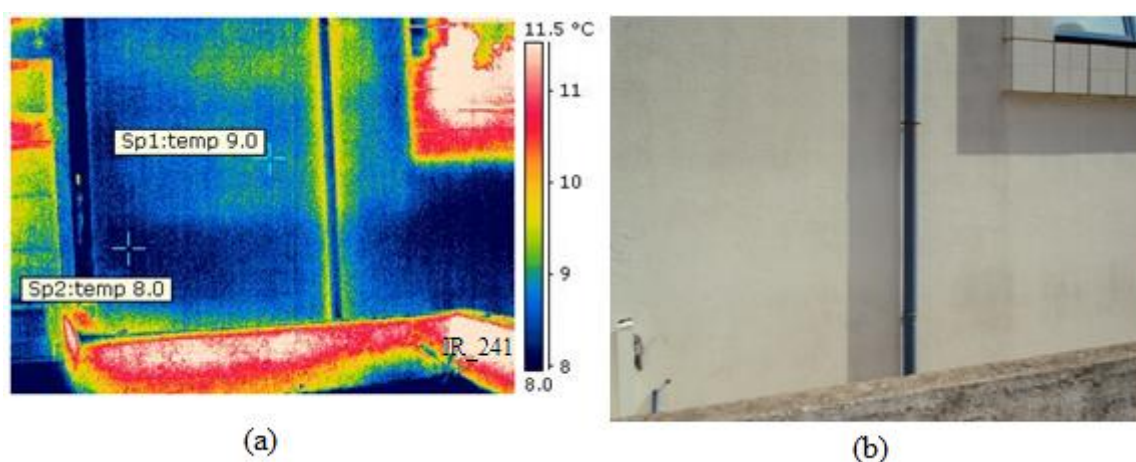


Figura 4.18 - (a) Imagem térmica IR\_241 da fachada Oeste; (b) Imagem visual

Relativamente às diferenças entre as temperaturas superficiais interior e exterior, observa-se que, no canto interior esquerdo, as diferenças podem chegar aos 9°C ( $16,6 - 7,7 = 8,9$  °C) na zona do pilar ou aos 8°C ( $17,2 - 9,0 = 8,2$  °C) na zona corrente, como se observa nas figuras 4.14 e 4.16. Em relação ao canto interior direito, as diferenças não são tão significativas porque as temperaturas interiores são mais baixas, mas observando as figuras 4.15 e 4.18, verifica-se uma diferença de, aproximadamente, 5°C ( $12,7 - 8 = 4,7$  °C) na zona do canto, enquanto na zona corrente a diferença é de 6°C ( $14,8 - 9 = 5,8$  °C).

A maior diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial mínima interior atinge os 6,2°C ( $18,9 - 12,7 = 6,2$  °C), enquanto a diferença entre a temperatura ambiente exterior e interior é de 8,3°C (ver dados do quadro 4.3).

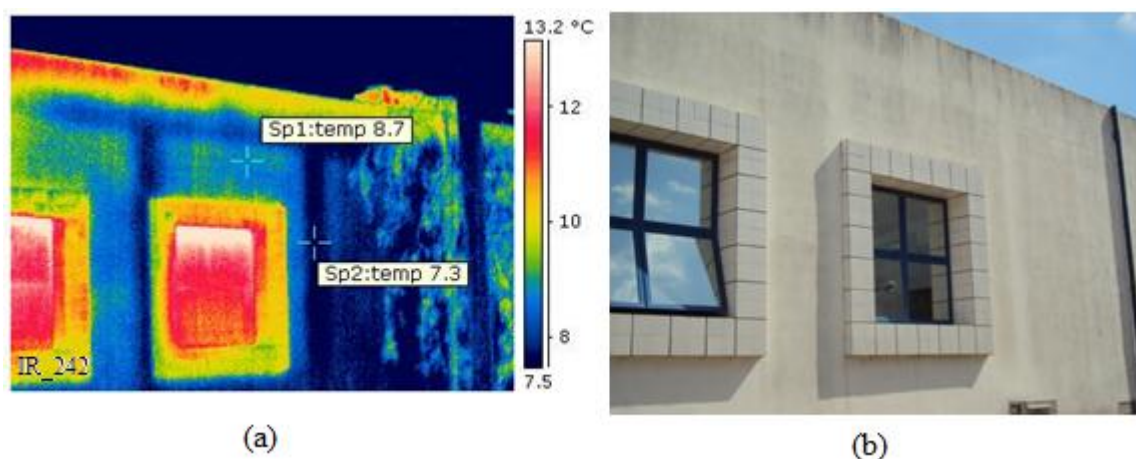


Figura 4.19 - (a) Imagem térmica IR\_242 da fachada Oeste; (b) Imagem visual

4. Análise ao edifício X na zona indicada na figura 4.20. A seguir à Biblioteca, este é o edifício mais recente da FCT (concluído em 2000). A análise é feita no 2º piso na fachada Sul, numa zona comum mas é um local bastante frequentado pelos alunos, apesar de não ser uma sala de aula, para estudar e para o convívio.

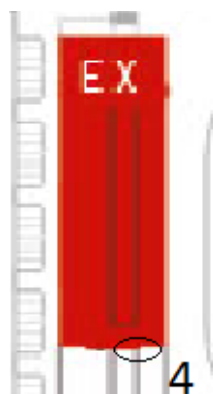


Figura 4.20 – Planta do edifício X, localização da análise 4

Quadro 4.4 - Dados da análise experimental do local 4

Nº foto	Data	Hora	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	Localização
IR_260	02-02-2010	20:58	-	17,3	Interior, Edifício X, Fachada Sul, Zona inferior
IR_261	02-02-2010	21:00	-	17,3	Interior, Edifício X, Fachada Sul, Zona superior
IR_228	02-02-2010	21:07	10,4	-	Exterior, Edifício X, Fachada Sul



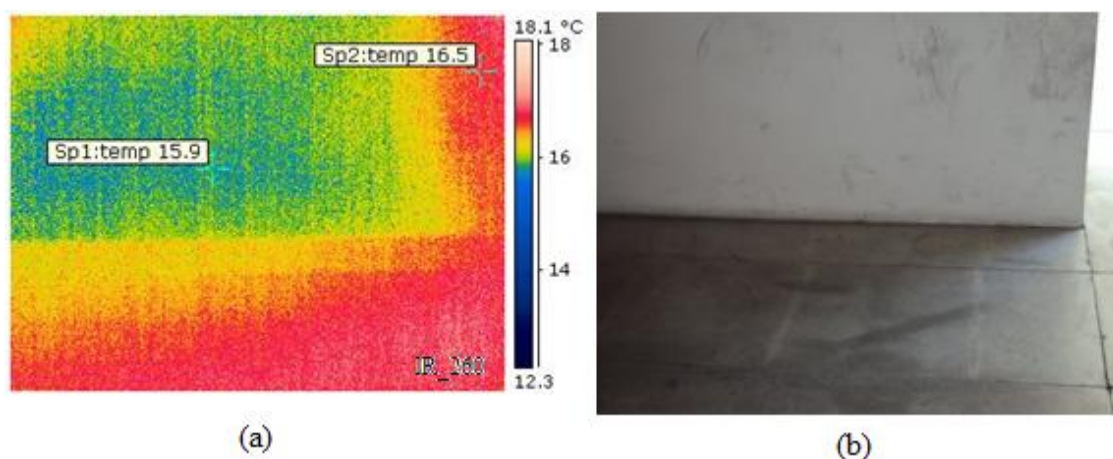


Figura 4.21 - (a) Imagem térmica IR\_260 da fachada Sul; (b) Imagem visual

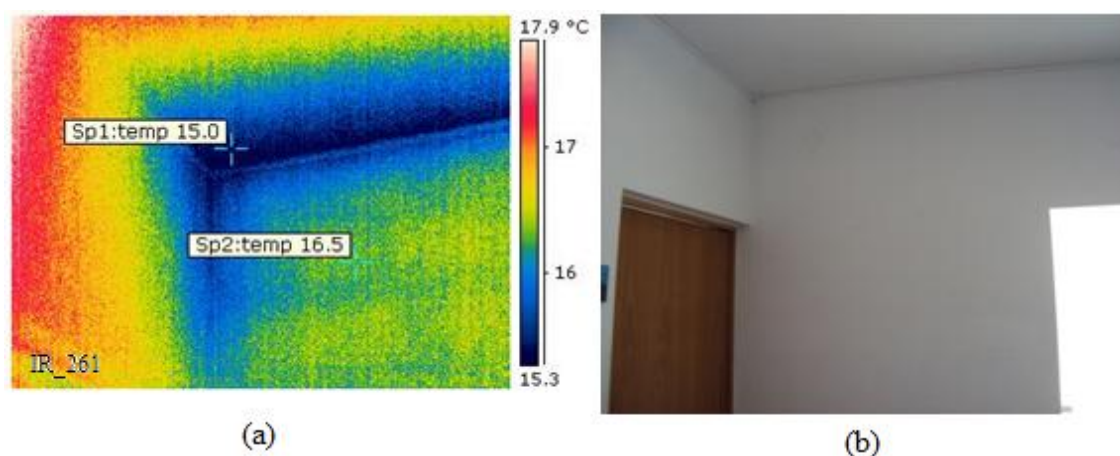


Figura 4.22 - (a) Imagem térmica IR\_261 da fachada Sul; (b) Imagem visual

As diferenças de temperatura superficial interior na zona inferior são menores do que na zona superior, onde atingem valores de 1,5°C (figuras 4.21 e 4.22). De facto, no canto superior é onde se atinge a temperatura superficial mais baixa, sendo que em toda a restante envolvente as temperaturas superficiais não sofrem grandes alterações.

Depois de se observar a imagem do exterior, verifica-se que na zona superior a temperatura é mais elevada do que na zona inferior (diferenças de 1°C). Relativamente às temperaturas superficiais interiores, a diferença na zona superior ronda os 2°C enquanto na zona inferior esse valor anda na ordem dos 5°C.

A maior diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial mínima interior atinge os 2,3°C ( $17,3 - 15,0 = 2,3$  °C), enquanto a diferença entre a temperatura ambiente exterior e interior é de 6,9°C (ver dados do quadro 4.4).

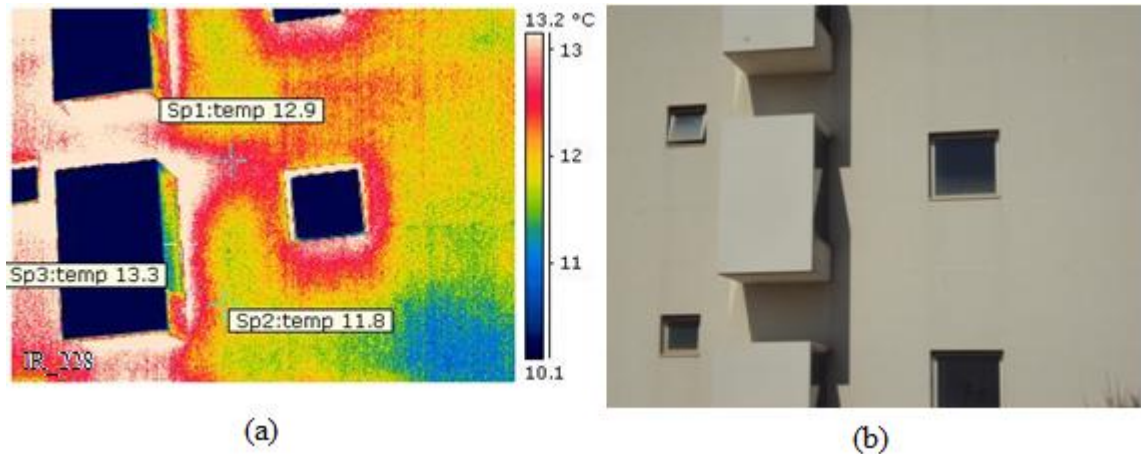


Figura 4.23 - (a) Imagem térmica da fachada Sul; (b) Imagem visual

5. Análise ao Edifício II na zona indicada na figura 4.24. O edifício II é o segundo mais antigo da FCT (concluído em 1983) e o local que foi alvo de estudo é uma sala de computadores (sala 235), que funcionam durante 24 horas, no 2º piso. Essa é a principal razão para a temperatura ambiente interior ser tão elevada quando comparada com outras zonas estudadas e se sentir um ambiente “abafado”. As zonas analisadas foram o canto Norte e as fachadas Noroeste e Nordeste.

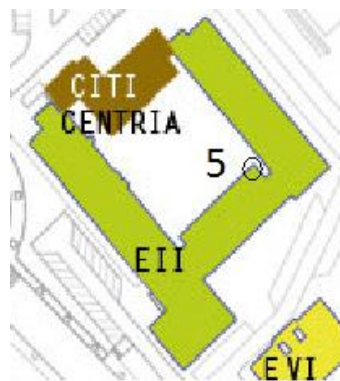


Figura 4.24 – Planta do edifício II, localização da análise 5

Quadro 4.5 - Dados da análise experimental do local 5

Nº foto	Data	Hora	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	Localização
IR_249	02-02-2010	19:44	-	25,0	Interior, Edifício II (sala 235), Canto Norte
IR_250	02-02-2010	19:46	-	25,0	Interior, Edifício II (sala 235), Fachada Noroeste
IR_252	02-02-2010	19:58	10,8	-	Exterior, Edifício II (sala 235), Fachada Noroeste
IR_253	02-02-2010	19:59	10,8	-	Exterior, Edifício II (sala 235), Fachada Nordeste
IR_254	02-02-2010	20:00	10,8	-	Exterior, Edifício II (sala 235), Canto Norte

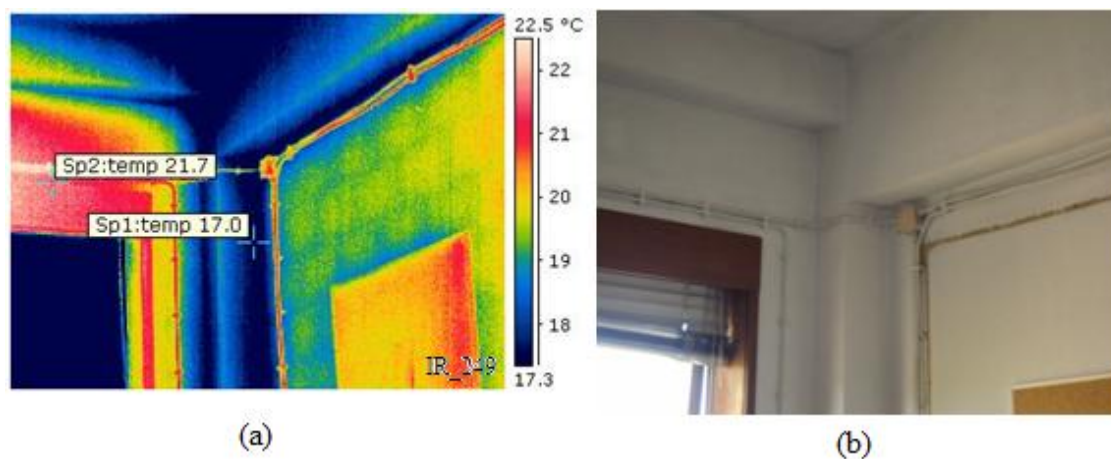


Figura 4.25 - (a) Imagem térmica IR\_249 do canto Norte; (b) Imagem visual

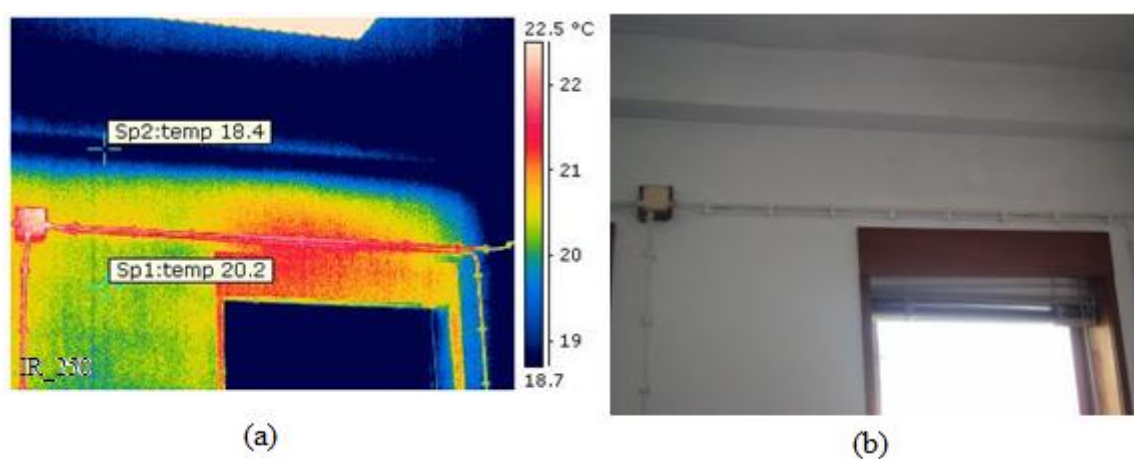


Figura 4.26 - (a) Imagem térmica IR\_250 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual

No interior (figuras 4.25 e 4.26), é possível verificar que a temperatura superficial é menor na zona do pilar de canto atingindo os 17°C. Nas zonas correntes adjacentes a temperatura é maior na fachada Noroeste, aproximadamente 21°C, enquanto na fachada Nordeste as temperaturas superficiais são ligeiramente mais baixas (aproximadamente 19°C).

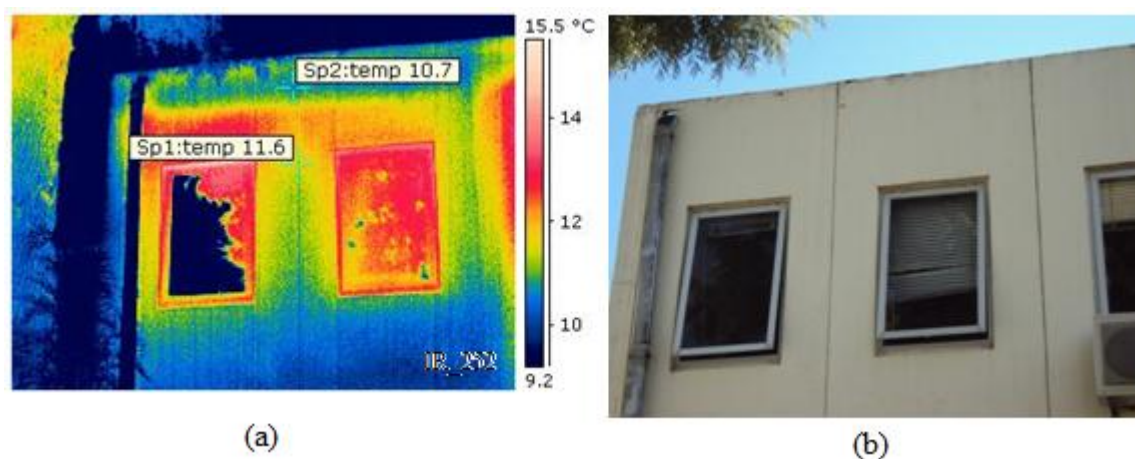


Figura 4.27 - (a) Imagem térmica IR\_252 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual

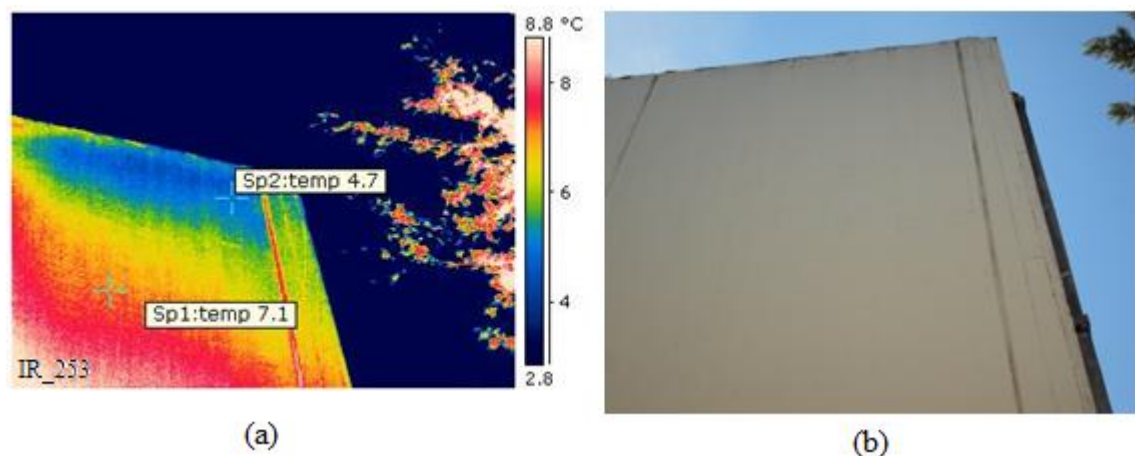


Figura 4.28 - (a) Imagem térmica IR\_253 da fachada Nordeste; (b) Imagem visual

Quanto às temperaturas superficiais exteriores, na fachada Noroeste a diferença entre a zona do “talão de viga” e a zona entre janelas é de 1°C (figura 4.27). Na fachada Nordeste as temperaturas superficiais são bastante inferiores às da fachada Noroeste, atingindo valores de 4,7°C. Na fachada Nordeste não há espaço para se conseguir obter um bom termograma, daí



que a figura 4.28 (a) não tenha a melhor qualidade. Ainda assim, admite-se que as temperaturas superficiais exteriores são, de facto, as indicadas.

Assim, as principais diferenças de temperatura entre o interior e o exterior ocorrem na zona acima da janela onde se atingem  $10^{\circ}\text{C}$  de diferença ( $21,7 - 11,6 = 10,1^{\circ}\text{C}$ ), na zona do “talão de viga” onde a diferença é de  $8^{\circ}\text{C}$  ( $18,4 - 10,7 = 7,7^{\circ}\text{C}$ ), na zona corrente da fachada Nordeste que são atingidos quase  $15^{\circ}\text{C}$  de diferença e na zona do pilar em que a diferença é de, aproximadamente,  $7^{\circ}\text{C}$ .

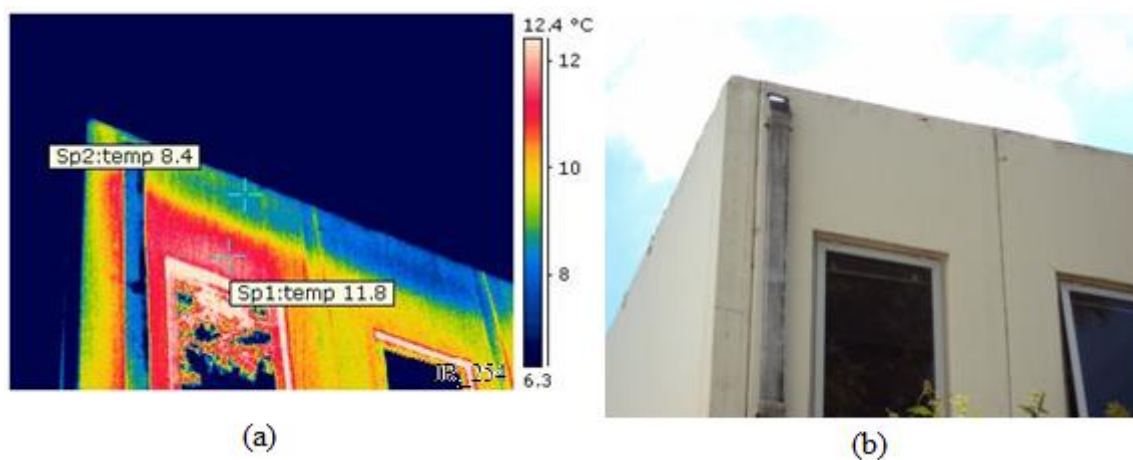


Figura 4.29 - (a) Imagem térmica IR\_254 da fachada Noroeste; (b) Imagem visual

A maior diferença entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial mínima interior atinge os  $8^{\circ}\text{C}$  ( $25,0 - 17,0 = 8^{\circ}\text{C}$ ), enquanto a diferença entre a temperatura ambiente exterior e a interior é de  $14,2^{\circ}\text{C}$  (ver dados do quadro 4.5).

Uma nota final importante sobre a análise termográfica aos locais 1 e 3. É visível nos termogramas que, no exterior, as zonas dos pilares têm uma temperatura superficial inferior às restantes zonas da envolvente, quando se esperava que fosse o contrário.

#### 4.1 Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “experimental”

Com o objectivo de tentar verificar em que locais há maior risco de desenvolvimento de bolores ou de condensações superficiais, são calculados os factores de temperatura superficial mínimos experimentais, os teóricos (1) e os teóricos (2), estes últimos nos pontos 4.2 e 4.3, respectivamente.

Para calcular os valores do  $f_{Rsi, \text{mín, exp.}}$  foi usada a equação 10 e foram utilizados todos os dados experimentais obtidos (temperatura ambiente interior, temperatura ambiente exterior e temperatura superficial interior mínima).

Quadro 4.6 - Factor de temperatura superficial mínimo experimental

Local	$\theta_e$ (°C)	$\theta_i$ (°C)	$\theta_{si, \text{mín}}$ (°C)	$f_{Rsi, \text{mín, exp.}}$
1	7,3	14,1	9,1	0,26
2	10,9	15,9	11,4	0,10
3	10,6	18,9	12,7	0,25
4	10,4	17,3	15	0,67
5	10,8	25	17	0,44

#### 4.2 Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “teórico 1”

Para o cálculo do factor de temperatura superficial teórico, é necessário recorrer ao exemplo 1 do Anexo B da EN ISO 13788, utilizando as classes de higrometria propostas por Vieira [11].

Os valores da temperatura ambiente exterior (quadro 4.7, coluna 1) são valores obtidos experimentalmente. A coluna 2 é preenchida com os valores da humidade relativa exterior, para a localização de Lisboa e para a data e hora da nossa actividade experimental.

A pressão exterior (coluna 3) depende da pressão de saturação exterior, que pode ser calculada através da expressão E.7 do Anexo E da EN ISO 13788:

$$p_{sat,e} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta_e}{237,3+\theta_e}} \quad (17)$$

Sabendo a pressão de saturação exterior, pode-se calcular a pressão exterior através da equação (6) da alínea a) do ponto 4.2.4 da EN ISO 13788:

$$p_{sat,e} = \frac{p_e}{\phi_e} \quad (18)$$

A variação de pressão (coluna 4) é retirada do quadro 1.1. O local 1 foi classificado com a classe de higrometria fraca por se tratar de uma zona comum, os locais 2, 3 e 4 foram classificados com a classe de higrometria média por serem salas de aula ou zonas de estudo e o local 5 foi classificado com a classe de higrometria forte por ser uma sala equipada com computadores, que trabalham 24 horas por dia e com bastante utilização por parte dos alunos.

A coluna 5 (pressão interior) é calculada somando os valores da coluna anterior com os valores da coluna 3, ou seja:

$$p_i = \Delta p + p_e \quad (19)$$

A pressão de saturação superficial interior (coluna 6) é obtida através da equação número 11 da alínea e) do ponto 5.3 da EN ISO 13788:

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{\phi_{si}} \quad (20)$$

A humidade relativa na superfície interior não pode exceder os 80%, já que este é o valor máximo até ao qual não há risco de formação de bolores e, por isso, o valor utilizado para todos os casos é 0,8. O valor da temperatura superficial interior mínima (coluna 7) é calculado com a equação E.9 da norma:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5}\right)} \quad (21)$$

A coluna 8 corresponde aos valores da temperatura ambiente interior. Para esta situação teórica, em que se admite o cumprimento da temperatura ambiente interior de conforto, são fixados os valores da temperatura ambiente interior (20°C) definidos para o Inverno no nosso país.

Depois de calculadas todas as colunas, como descreve a EN ISO 13788, pode-se finalmente calcular o factor de temperatura superficial mínimo teórico (coluna 9) através da equação 10.

Quadro 4.7 - Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo teórico segundo o exemplo 1 do Anexo B da EN ISO 13788

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Local</b>	<b><math>\theta_e</math> (°C)</b>	<b><math>\phi_e</math></b>	<b><math>p_e</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta p</math> (Pa)</b>	<b><math>p_i</math> (Pa)</b>	<b><math>p_{sat, \theta_{si}}</math> (Pa)</b>	<b><math>\theta_{si, \text{mín}}</math> (°C)</b>	<b><math>\theta_{i, \text{conf}}</math> (°C)</b>	<b><math>f_{Rsi, \text{mín, teórico (1)}}</math></b>
<b>1</b>	7,3	0,93	950,60	130,00	1080,60	1350,75	11,4	20	0,33
<b>2</b>	10,9	0,63	821,09	400,00	1221,09	1526,36	13,3	20	0,26
<b>3</b>	10,6	0,63	804,85	400,00	1204,85	1506,06	13,1	20	0,27
<b>4</b>	10,4	0,67	844,60	400,00	1244,60	1555,75	13,6	20	0,33
<b>5</b>	10,8	0,67	867,43	830,00	1697,43	2121,79	18,4	20	0,83

O  $f_{Rsi, \text{mín, teórico (1)}}$  é calculado com base na temperatura ambiente exterior (obtida experimentalmente), na temperatura superficial mínima (calculada) e na temperatura ambiente interior de conforto.

Neste momento já se podem comparar os valores reais e teóricos do factor de temperatura superficial mínimo. Para garantir que não há risco de desenvolvimento de bolores, é necessário que se exceda o  $f_{Rsi, \text{mín, teórico (1)}}$ , isto é, sempre que  $f_{Rsi, \text{mín, exp.}}$  é maior que  $f_{Rsi, \text{mín, teórico (1)}}$ .

Quadro 4.8 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental e teórico (1)

<b>Local</b>	<b><math>f_{Rsi, \text{mín, exp.}}</math></b>	<b><math>f_{Rsi, \text{mín, teórico (1)}}</math></b>
<b>1</b>	0,26	0,33
<b>2</b>	0,10	0,26
<b>3</b>	0,25	0,27
<b>4</b>	0,67	0,33
<b>5</b>	0,44	0,83

Verifica-se, assim, que o local 4 cumpre esta regra e não está em risco de aparecimento de anomalias associadas às condensações superficiais.

O local 3 está no limite, já que os factores de temperatura superficial experimental e teórico são praticamente iguais. Sabendo que o aumento ou diminuição da temperatura

ambiente interior provoca o aumento ou diminuição da temperatura superficial interior, pode-se prever quando existe risco de condensações superficiais. A título de exemplo, imagine-se que um aumento de 1°C na temperatura ambiente interior provoca um aumento de 0,4°C na temperatura superficial interior mínima. Esta alteração levaria a uma variação do valor do  $f_{Rsi}$  de 0,25 para 0,27 (diminuindo um pouco o risco de aparecimento de anomalias). Se se admitir o contrário, ou seja, uma diminuição da temperatura ambiente interior de 1°C e uma diminuição de 0,4°C na temperatura superficial interior, verifica-se uma mudança no valor do  $f_{Rsi}$  de 0,25 para 0,23 (aumentando o risco).

Este raciocínio é apenas exemplificativo para que se perceba que um aumento na temperatura ambiente interior, acompanhado com o aumento na temperatura superficial, provoca um aumento no factor de temperatura superficial mínimo, reduzindo ou mesmo eliminando o risco de desenvolvimento de anomalias relacionadas com as condensações superficiais.

Nos locais 1, 2 e 5 existe risco de desenvolvimento de bolores. No local 1, o risco deve-se ao facto de ser uma zona não aquecida, onde a temperatura costuma ser mais baixa que nas restantes zonas dos edifícios e há ausência de luz solar. O local 2 situa-se numa zona do edifício que não favorece o aquecimento (fachada voltada para Este). Ao entrar na sala sentia-se frio e, de facto, a temperatura interior é mais baixa quando comparada com outros locais analisados no mesmo dia. No local 5 foi admitida uma classe de higrometria forte, daí haver risco de desenvolvimento de bolores. Se a classe de higrometria tivesse sido considerada média, já não existia risco.

Depois de observado o quadro 4.8 e verificadas algumas diferenças entre os dois factores de temperatura superficial, resta analisar a situação do método teórico do exemplo 1 do Anexo B da norma EN ISO 13788 que leva à obtenção de valores da temperatura superficial interior mínima bastante diferentes dos reais. Tais fenómenos podem, também, ser verificados com uma análise às temperaturas superficiais interiores.

Quadro 4.9 - Comparação entre a temperatura mínima experimental e teórica (1)

<b>Local</b>	<b><math>\theta_{si, \text{mín, exp.}}</math></b>	<b><math>\theta_{si, \text{mín, teórica (1)}}</math></b>
<b>1</b>	9,1	11,4
<b>2</b>	11,4	13,3
<b>3</b>	12,7	13,1
<b>4</b>	15	13,6
<b>5</b>	17	18,4

No quadro 4.9 notam-se quais as diferenças entre a temperatura superficial interior mínima experimental (retirada das fotografias termográficas) e a temperatura superficial interior mínima teórica (calculada como no exemplo da norma e baseada na pressão interior). Percebe-se também que sempre que a temperatura superficial interior mínima teórica é maior que a experimental, o factor de temperatura superficial interior teórico também é maior que o experimental. Assim, facilmente se verifica que nos locais onde as temperaturas superficiais interiores são menores que a temperatura superficial mínima há o risco de ocorrência de bolores. As conclusões são as mesmas que no caso da análise através do factor de temperatura superficial mínimo.

### 4.3 Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo “teórico 2”

Também se podem obter os valores dos factores de temperatura superficial teóricos através do exemplo 2 do Anexo B da EN ISO 13788, que assume uma humidade relativa interior constante.

Os valores da temperatura ambiente interior (quadro 4.10, colunas 1 e 2, respectivamente) são obtidos experimentalmente. A humidade relativa interior (coluna 3) é fixada entre os 50% e os 60%, por se considerarem estes os valores confortáveis no Inverno, aumentados 5% por recomendação da norma.

Na coluna 4 são calculados os valores da pressão interior. Estes valores são obtidos multiplicando a pressão de saturação interior pelo valor da humidade relativa, ou seja:

$$p_i = \phi_i \cdot p_{sat,i} \quad (22)$$

A pressão de saturação interior é calculada através da fórmula E.7 do Anexo E da norma EN ISO 13788:

$$p_{sat,i} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta_i}{237,3+\theta_i}} \quad (23)$$

A pressão de saturação superficial interior (coluna 5) é obtida através da equação número 11 da alínea e) do ponto 5.3 da EN ISO 13788:

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{\phi_{si}}$$

A humidade relativa na superfície interior não pode exceder os 80%, pelas razões já descritas anteriormente. O valor da temperatura superficial interior mínima (coluna 6) é calculado com a equação E.9 da norma:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5}\right)}$$

Depois de calculadas todas as colunas, como descreve a EN ISO 13788, pode-se finalmente calcular o factor de temperatura superficial teórico (coluna 7) através da equação 10.

Quadro 4.10 - Cálculo do factor de temperatura superficial mínimo teórico segundo o exemplo 2 do Anexo B da EN ISO 13788

	1	2	3	4	5	6	7
<b>Local</b>	<b><math>\theta_e</math> (°C)</b>	<b><math>\theta_i</math> (°C)</b>	<b><math>\phi_i</math></b>	<b><math>p_i</math> (Pa)</b>	<b><math>p_{sat, \theta_{si}}</math> (Pa)</b>	<b><math>\theta_{si, mín}</math> (°C)</b>	<b><math>f_{Rsi, mín, teórico (2)}</math></b>
<b>1</b>	7,3	14,1	0,55	884,47	1105,59	8,5	0,17
<b>2</b>	10,9	15,9	0,6	1083,42	1354,28	11,5	0,12
<b>3</b>	10,6	18,9	0,6	1309,49	1636,87	14,4	0,45
<b>4</b>	10,4	17,3	0,6	1184,26	1480,33	12,8	0,35
<b>5</b>	10,8	25	0,65	2057,85	2572,31	21,6	0,76

Os valores da humidade relativa interior podem variar até aos 80%, dependendo principalmente da produção de vapor de água e da ventilação do local, entre outros factores. Sabe-se que não se pode exceder os 80% de humidade relativa, correndo-se o risco de desenvolvimento de bolores, nem atingir os 100% já que nesses casos existem condensações superficiais.

Neste exemplo, sempre que se excede o  $f_{Rsi, mín., teórico (2)}$ , isto é, sempre que  $f_{Rsi, mín., exp.}$  é maior que  $f_{Rsi, mín., teórico (2)}$ , significa que a temperatura superficial interior do local é maior que a temperatura superficial interior mínima, ou seja, que não há risco de desenvolvimento de bolores para a humidade relativa interior fixada.

O  $f_{Rsi, mín., teórico (2)}$  é calculado com base na temperatura ambiente exterior e interior (obtidas experimentalmente) e na temperatura superficial mínima (calculada conforme o exemplo 2 da norma).

Quadro 4.11 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental e teórico (2)

<b>Local</b>	<b><math>f_{Rsi, \text{mín, exp.}}</math></b>	<b><math>f_{Rsi, \text{mín, teórico (2)}}</math></b>
<b>1</b>	0,26	0,17
<b>2</b>	0,10	0,12
<b>3</b>	0,25	0,45
<b>4</b>	0,67	0,35
<b>5</b>	0,44	0,76

Todos os valores são obtidos para a humidade relativa fixada para cada local. Se houver alguma alteração na humidade relativa interior, então os valores do factor de temperatura superficial teórico também alteram, originando algumas diferenças relativamente aos analisados.

Assim sendo, e com base nestes valores fixados, nos locais 1 e 4 não há risco de desenvolvimento de bolores porque os valores do factor de temperatura superficial interior experimental superam os valores teóricos; o local 2 está no limite, já que o factor de temperatura superficial experimental é bastante próximo do teórico; e nos locais 3 e 5 há risco de aparecimento de anomalias associadas às condensações superficiais.

Quadro 4.12 - Comparação entre a temperatura mínima experimental e teórica (2)

<b>Local</b>	<b><math>\theta_{si, \text{mín, exp.}}</math></b>	<b><math>\theta_{si, \text{mín, teórica (2)}}</math></b>
<b>1</b>	9,1	8,5
<b>2</b>	11,4	11,5
<b>3</b>	12,7	14,4
<b>4</b>	15	12,8
<b>5</b>	17	21,6

No quadro 4.12 notam-se quais as diferenças entre a temperatura superficial interior mínima experimental (retirada das fotografias termográficas) e a temperatura superficial interior mínima teórica (calculada como no exemplo da norma). Sempre que o factor de temperatura superficial interior teórico é maior que o experimental, a temperatura superficial interior mínima teórica também é maior que a experimental.

Assim, tal como na análise ao factor de temperatura superficial, nos locais 1 e 4 não há risco de ocorrência de desenvolvimento de bolores porque a temperatura superficial interior mínima experimental é maior que a temperatura superficial interior mínima teórica; no local 2 as temperaturas superficiais mínimas estão muito próximas uma da outra, estando-se no limite



da possibilidade de desenvolvimento de bolores; e nos locais 3 e 5 há risco de aparecimento de anomalias associadas às condensações superficiais, já que a temperatura superficial interior mínima experimental não atinge o valor mínimo da temperatura superficial teórico.

Os locais 3 e 5 são dois dos locais onde se consideram valores da humidade relativa interior maiores e onde as temperaturas interiores são mais elevadas que nos restantes locais.

#### **4.4 Coeficiente de transmissão térmica máximo para as zonas correntes da envolvente**

Considerando um regime permanente na transmissão de calor do interior para o exterior (situação da estação de aquecimento) e um fluxo unidireccional, é possível saber qual o valor do coeficiente de transmissão térmica máximo que não permite o desenvolvimento de bolores, para inúmeras situações que ocorrem ao longo do Inverno. O raciocínio não está previsto em nenhuma norma, mas já foi executado por Vieira e por Castro, com abordagens diferentes uma da outra [10 e 42].

Pode-se relacionar o coeficiente de transmissão térmica com o factor de temperatura superficial através da equação 11, que pode ser escrita de outra forma:

$$U = \frac{(1 - f_{Rsi})}{R_{si}} \quad (24)$$

A metodologia adoptada é semelhante à do ponto anterior, adicionando este último passo ao processo. Assim, é possível determinar o valor máximo do coeficiente de transmissão térmica para que não haja risco de desenvolvimento de bolores para as várias condições possíveis. A EN ISO 10211 indica que os valores da resistência superficial para cálculos de risco de condensações são obtidos na EN ISO 13788. É utilizado um valor de  $R_{si}$  de  $0,25 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$  por se tratar de um valor menos conservativo que o habitualmente utilizado ( $0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ), como previsto na tabela 2 da EN ISO 13788, para verificar em que casos o risco de condensação é maior.

Para a temperatura ambiente interior obtida experimentalmente e para um determinado valor da humidade relativa, varia-se a temperatura exterior dos 0°C aos 11°C.

Quadro 4.13 – Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 45% no local 2

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{max}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
15,9	11	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,01	3,98
15,9	10	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,17	3,30
15,9	9	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,29	2,82
15,9	8	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,38	2,47
15,9	7	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,45	2,19
15,9	6	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,51	1,97
15,9	5	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,55	1,79
15,9	4	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,59	1,64
15,9	3	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,62	1,51
15,9	2	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,65	1,40
15,9	1	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,67	1,31
15,9	0	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,69	1,23

Quadro 4.14 – Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 50% no local 2

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{max}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
15,9	11	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,33	2,67
15,9	10	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,44	2,22
15,9	9	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,53	1,90
15,9	8	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,59	1,66
15,9	7	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,63	1,47
15,9	6	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,67	1,32
15,9	5	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,70	1,20
15,9	4	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,72	1,10
15,9	3	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,75	1,02
15,9	2	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,76	0,94
15,9	1	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,78	0,88
15,9	0	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,79	0,82

Quadro 4.15 – Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 55% no local 2

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{max}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
15,9	11	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,63	1,48
15,9	10	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,69	1,23
15,9	9	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,74	1,05
15,9	8	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,77	0,92
15,9	7	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,80	0,82
15,9	6	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,82	0,73
15,9	5	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,83	0,67
15,9	4	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,85	0,61
15,9	3	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,86	0,56
15,9	2	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,87	0,52
15,9	1	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,88	0,49
15,9	0	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,89	0,46

Quadro 4.16 – Coeficiente de transmissão térmica máximo para uma humidade relativa de 60% no local 2

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{max}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
15,9	11	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,91	0,38
15,9	10	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,92	0,32
15,9	9	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,93	0,27
15,9	8	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,94	0,24
15,9	7	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,95	0,21
15,9	6	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,95	0,19
15,9	5	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,96	0,17
15,9	4	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,96	0,16
15,9	3	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,96	0,14
15,9	2	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,97	0,13
15,9	1	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,97	0,12
15,9	0	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,97	0,12

Neste exemplo para o local 2, varia-se a humidade relativa interior dos 45% até aos 60%, fixando sempre os valores da temperatura ambiente interior obtidos experimentalmente. Foi restringido o valor de 60% de humidade relativa para este caso porque os valores do coeficiente de transmissão térmica já eram bastante baixos, no entanto nos restantes casos a humidade relativa varia até percentagens maiores. O que se pretende observar é qual o valor máximo do coeficiente de transmissão térmica para cada par de valores da temperatura ambiente e da humidade relativa interior.

Em seguida são apresentados os gráficos com os valores do coeficiente de transmissão térmica para os vários locais (figura 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33) e para a temperatura de conforto (figura 4.34), enquanto as tabelas dos cálculos se encontram no Anexo 3.

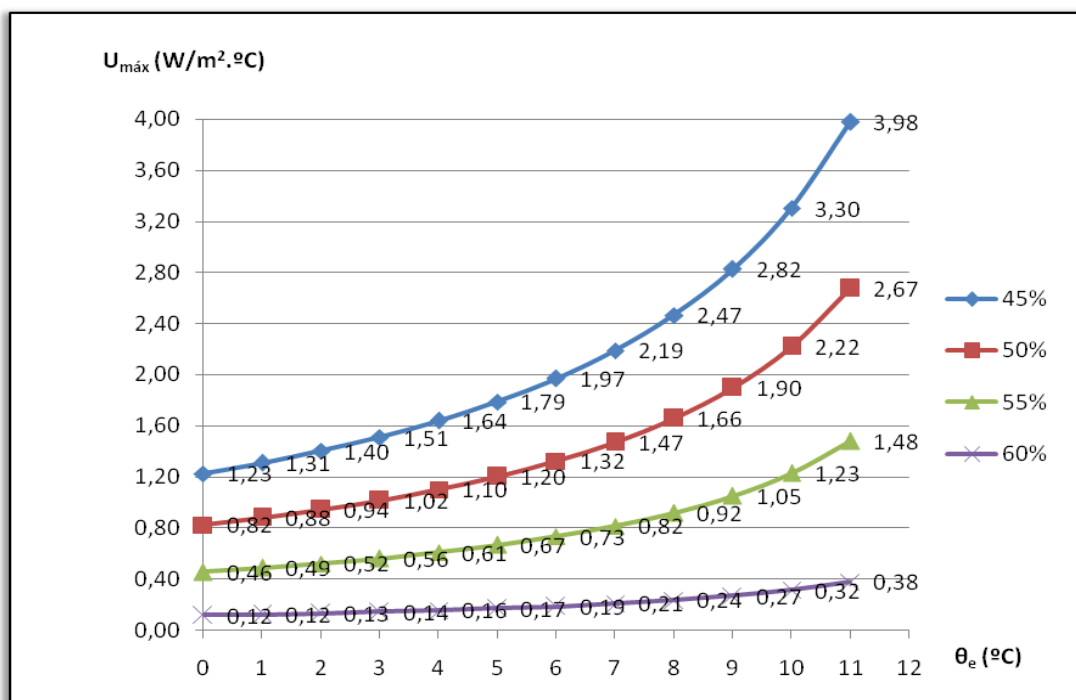


Figura 4.30 – Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 2

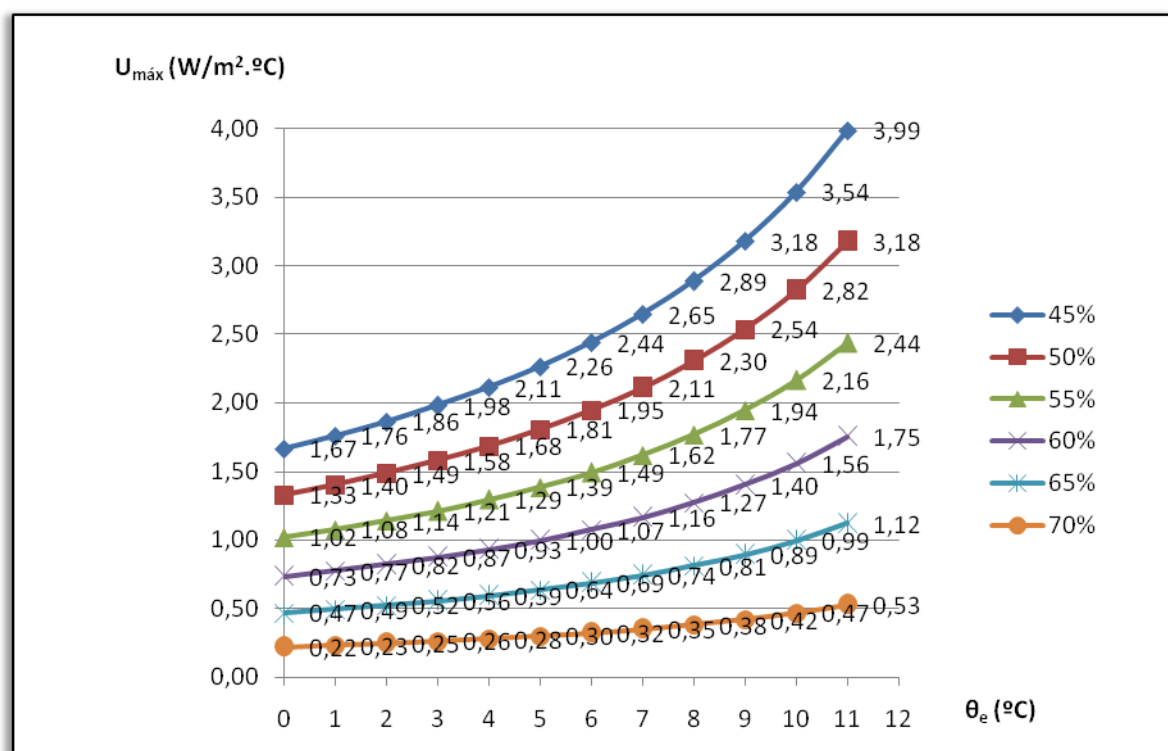


Figura 4.31 – Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 3

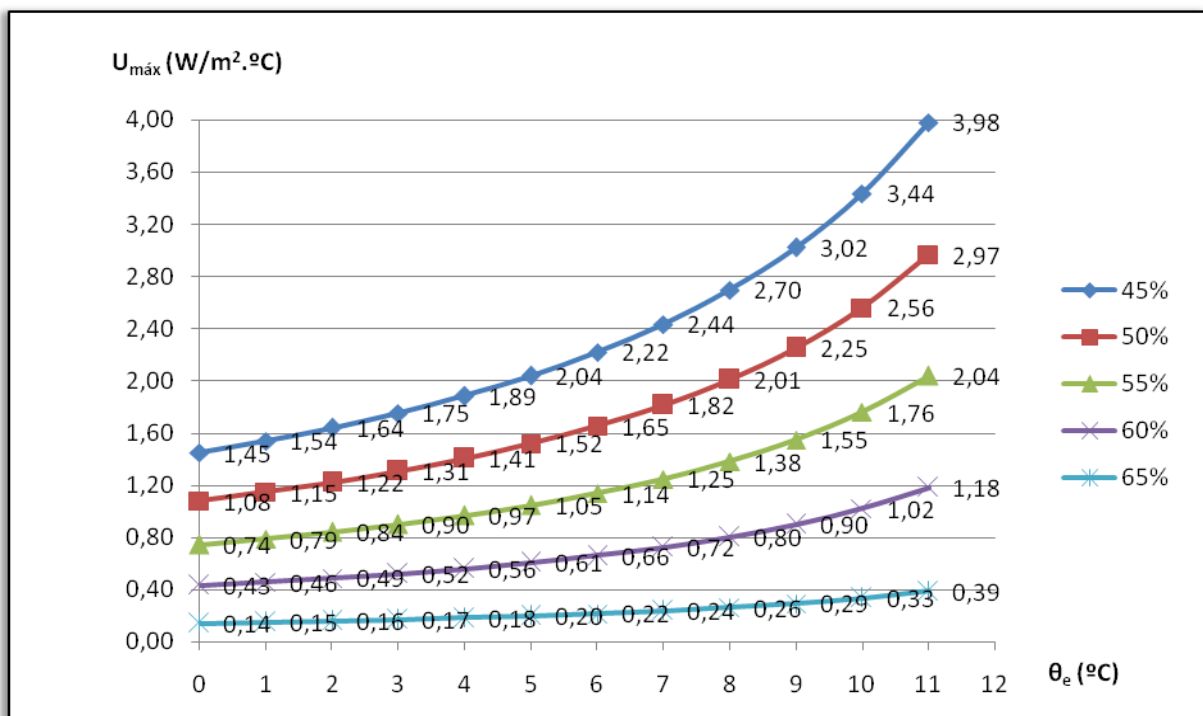


Figura 4.32 – Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 4

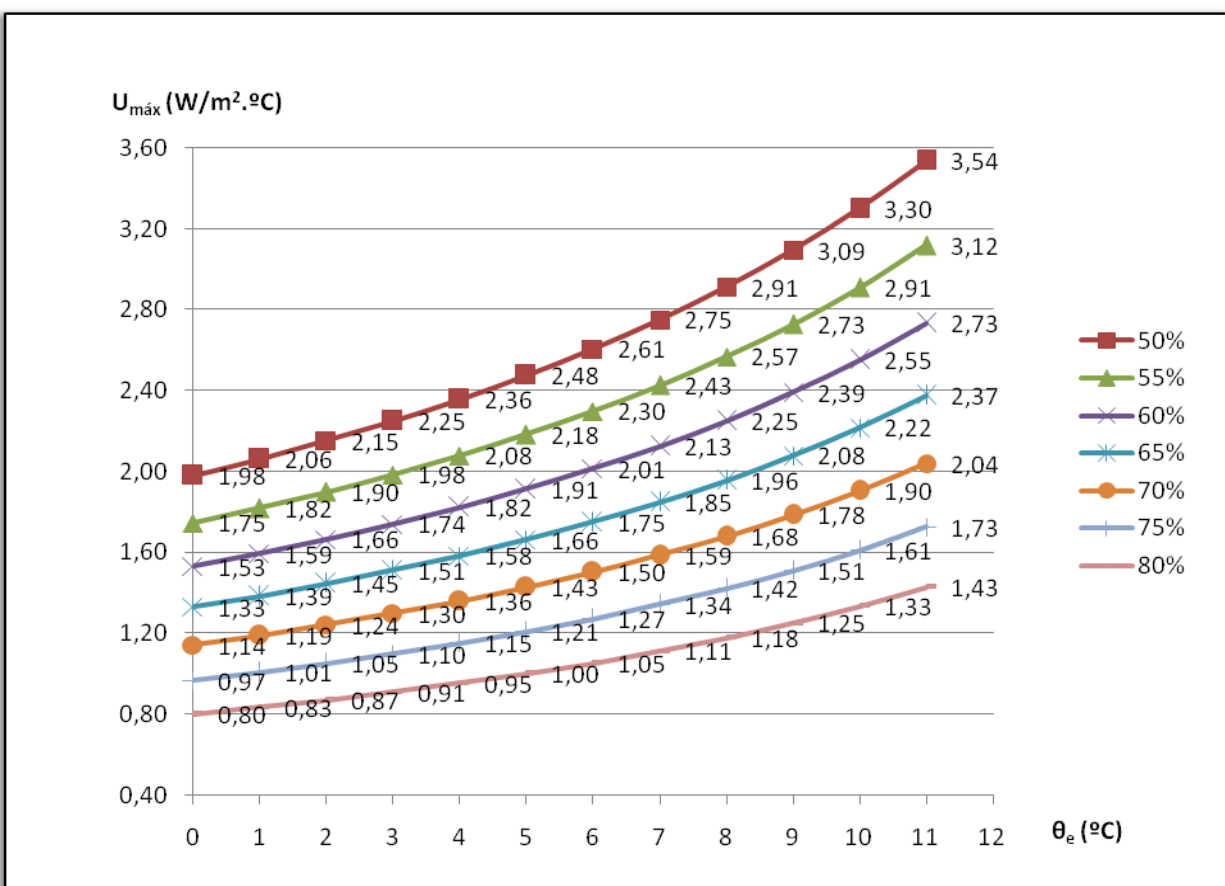


Figura 4.33 – Coeficientes de transmissão térmica máximos para o local 5

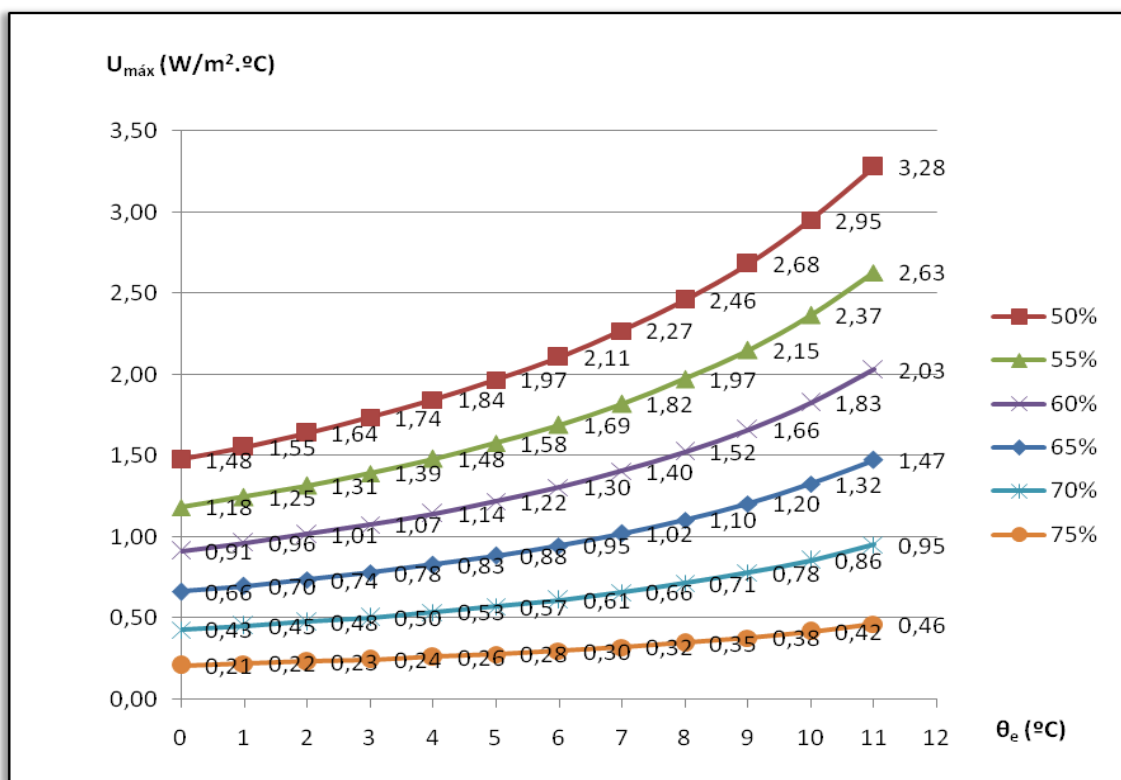


Figura 4.34 - Coeficientes de transmissão térmica máximos para a temperatura de conforto

Através da figura 4.34, é possível ver que para os dias mais frios de Janeiro (4°C) e de Fevereiro (3°C) os coeficientes de transmissão térmica variam entre os 0,26 e 1,84  $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  e os 0,24 e 1,74  $\text{W/m}^2$ , respectivamente, conforme for a humidade relativa interior.

#### 4.4.1 Cálculo dos coeficientes de transmissão térmica reais

Aplicando a equação 9, pode-se calcular o coeficiente de transmissão térmica dos locais analisados para que se possam comparar com os valores máximos calculados no ponto 4.4. Assim, recorrendo aos pormenores construtivos (figuras 4.35, 4.36 e 4.37) do trabalho complementar desta Dissertação intitulado “Avaliação do impacto das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL – análise numérica” são retiradas as espessuras de cada elemento constituinte da envolvente e são preenchidos os quadros 4.17, 4.18 e 4.19. Os valores da condutibilidade térmica e da resistência térmica de cada material não homogéneo são retirados do ITE 50 [18]. Os pormenores construtivos do edifício II (locais 2 e 3) não foram encontrados, por essa razão não é feito o cálculo do coeficiente de transmissão térmica.

##### Local 1 (edifício VII)

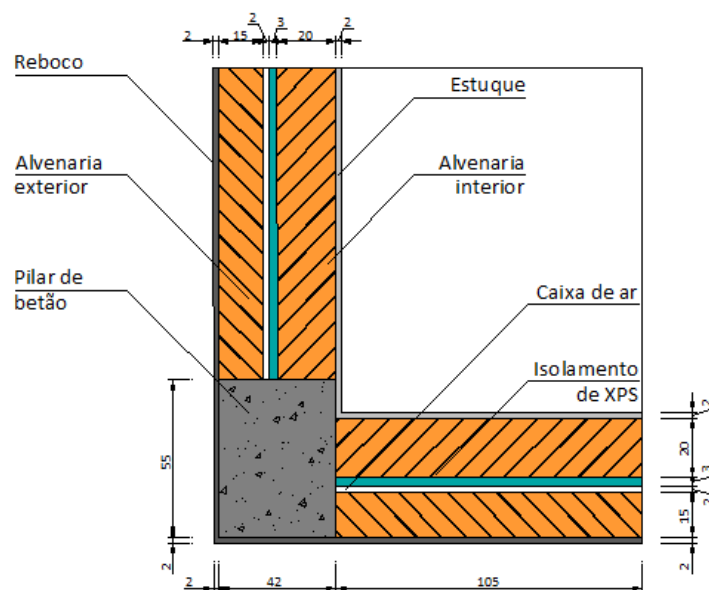


Figura 4.35 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 1

Quadro 4.17 - Coeficiente de transmissão térmica do local 1

Elemento	$\lambda$ (W/(m.°C))	Espessura (m)	Resistência térmica ((m <sup>2</sup> .°C)/W)	U (W/(m <sup>2</sup> .°C))
Reboco	1,3	0,02	0,015	0,46
Tijolo 15	-	0,15	0,390	
Caixa-de-ar	-	0,02	0,180	
Isolamento térmico – XPS	0,037	0,03	0,811	
Tijolo 20	-	0,20	0,520	
Estuque Projectado	0,18	0,02	0,111	
R <sub>si</sub>	-	-	0,13	
R <sub>se</sub>	-	-	0,04	

Local 4 (edifício X)

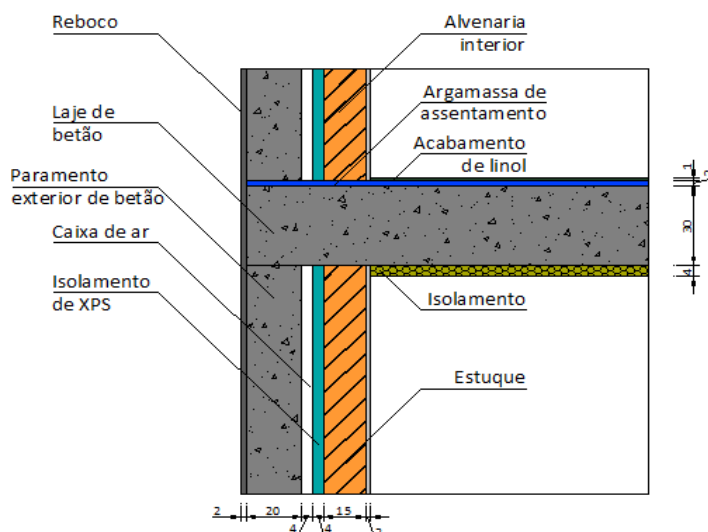


Figura 4.36 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 4

Quadro 4.18 - Coeficiente de transmissão térmica do local 4

Elemento	$\lambda$ (W/(m.°C))	Espessura (m)	Resistência Térmica ((m <sup>2</sup> .°C)/W)	U (W/(m <sup>2</sup> .°C))
Reboco	1,3	0,02	0,015	0,48
Betão	1,75	0,20	0,114	
Caixa-de-ar	-	0,04	0,18	
Isolamento térmico - XPS	0,037	0,04	1,081	
Tijolo 15	-	0,15	0,390	
Estuque projectado	0,18	0,02	0,111	
R <sub>si</sub>	-	-	0,13	
R <sub>se</sub>	-	-	0,04	



Local 5 (edifício II)

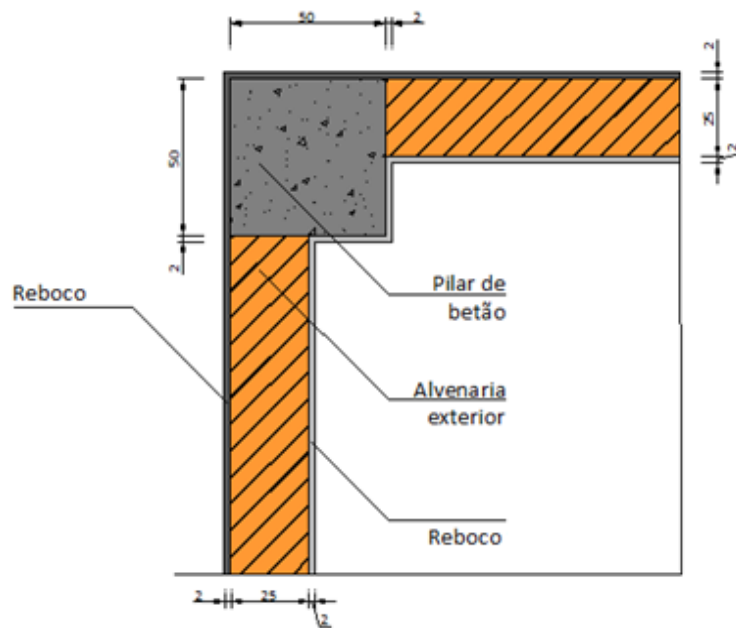


Figura 4.37 - Pormenor construtivo da zona analisada no local 5

Quadro 4.19 - Coeficiente de transmissão térmica do local 5

Elemento	$\lambda$ (W/(m.°C))	Espessura (m)	Resistência Térmica (m².°C)/W)	U (W/(m².°C))
Reboco	1,3	0,02	0,015	1,32
Tijolo 25	-	0,25	0,560	
Reboco	1,3	0,02	0,015	
R <sub>si</sub>	-	-	0,13	
R <sub>se</sub>	-	-	0,04	

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Principais conclusões

Se se admitir o valor de 0,50 como mínimo aceitável para o factor de temperatura superficial (“escritórios, lojas” no quadro 2.3), verifica-se que apenas o local 4 está fora de perigo de ocorrência de condensações ou desenvolvimento de bolores. O facto da análise experimental ter sido feita num único momento de um dia frio, em vez de ter sido feita uma análise mensal, torna os valores experimentais um pouco mais baixos que os mínimos estabelecidos pela literatura.

Os métodos propostos pela EN ISO 13788 são métodos desenvolvidos há alguns anos, mais adequados a regimes frios, onde as diferenças de temperatura entre o interior e o exterior são muito maiores do que em Portugal. Ainda assim, adaptando estes métodos à realidade portuguesa, é possível verificar se existe a possibilidade de desenvolvimento de bolores.

Recorrendo aos exemplos 1 e 2 do Anexo B da EN ISO 13788, é possível calcular o factor de temperatura superficial de duas maneiras distintas. A primeira é baseada na temperatura ambiente exterior e na humidade relativa exterior, usando as classes de higrometria adaptadas para Portugal. A segunda é baseada na temperatura ambiente interior, assumindo uma humidade relativa interior constante para cada local conforme a ocupação.

Quadro 5.1 - Comparação entre o factor de temperatura superficial mínimo experimental, teórico (1) e teórico (2)

Local	$f_{Rsi, \min, \text{exp.}}$	$f_{Rsi, \min, \text{teórico (1)}}$	$f_{Rsi, \min, \text{teórico (2)}}$
1	0,26	0,33	0,17
2	0,10	0,26	0,12
3	0,25	0,27	0,45
4	0,67	0,33	0,35
5	0,44	0,83	0,76

Quadro 5.2 - Comparação entre a temperatura superficial interior mínima experimental, teórica (1) e teórica (2)

Local	$\theta_{si, \min, \text{exp.}}$	$\theta_{si, \min, \text{teórica (1)}}$	$\theta_{si, \min, \text{teórica (2)}}$
1	9,1	11,4	8,5
2	11,4	13,3	11,5
3	12,7	13,1	14,4
4	15	13,6	12,8
5	17	18,4	21,6

Vejam-se os quadros completos dos valores do factor de temperatura superficial mínimo e das temperaturas superficiais mínimas para os diversos locais (quadros 5.1 e 5.2).

Para qualquer tipo de exemplo, o local 4 nunca corre o risco de desenvolvimento de bolores nem outras anomalias associadas às condensações superficiais. O local 1 corre risco de desenvolvimento de bolores para o exemplo 1, mas para o exemplo 2 já não há esse risco. O local 5 corre sempre o risco de desenvolvimento de bolores para as condições estudadas. Os locais 2 e 3 estão no limite para um dos exemplos (exemplo 1 no caso do local 3 e exemplo 2 no local 2) e há possibilidade de desenvolvimento de bolores para o outro exemplo.

Todo este raciocínio é feito para que se entenda que nenhum dos exemplos é mais correcto que o outro. São apenas indicadores das possibilidades de desenvolvimento de bolores nos locais, para as condições fixadas, quer seja a temperatura ambiente interior de conforto e as classes de higrometria no exemplo 1, quer seja a humidade relativa interior no exemplo 2. Qualquer alteração numa destas condições leva a alterações bastante significativas nos resultados finais, já que os restantes dados são adquiridos experimentalmente.

Assim, de acordo com as condições utilizadas, pode-se dizer que os resultados levam a concluir que os edifícios mais antigos são os que têm maior probabilidade de desenvolvimento de bolores. A temperatura superficial nesses edifícios é mais baixa que nos edifícios mais recentes, no entanto nos locais analisados, não há vestígios de desenvolvimento de bolores. Esta análise foi feita instantaneamente e não ao longo de vários dias, semanas ou meses, por isso é natural que as condições termo-higrométricas sejam mais desfavoráveis nos dias mais frios do que naqueles em que foi feita a análise experimental.

Quadro 5.3 - Diferenças de temperatura dos diversos locais

Locais	$\theta_i(^{\circ}\text{C})$	$\theta_e(^{\circ}\text{C})$	$\theta_{si, \text{mín.}}(^{\circ}\text{C})$	$\theta_i - \theta_{si, \text{mín.}}(^{\circ}\text{C})$	$\theta_i - \theta_e(^{\circ}\text{C})$
1 (edifício VII)	14,1	7,3	9,1	5	6,8
2 (edifício IV)	15,9	10,9	11,4	4,5	5
3 (edifício IV)	18,9	10,6	12,7	6,2	8,3
4 (edifício X)	17,3	10,4	15	2,3	6,9
5 (edifício II)	25	10,8	17	8	14,2

Ao analisar as diferenças entre a temperatura ambiente interior e a temperatura superficial interior e entre a temperatura ambiente interior e a temperatura ambiente exterior (ver quadro 5.3), verifica-se que as primeiras diferenças são maiores nos edifícios antigos. Isto prova que quanto maior for a diferença de temperatura, maiores são as perdas de calor através das zonas de pontes térmicas da envolvente. Relativamente às segundas diferenças, o local 2 é o que tem uma diferença menor. Este local, como já foi referido no capítulo anterior era de facto o local onde se sentia mais frio, por isso a diferença de 5°C para a temperatura ambiente exterior só prova que a envolvente nada protege nem melhora a temperatura ambiente interior.

Quanto aos valores máximos dos coeficientes de transmissão térmica para que não se corra o risco de ocorrência de condensações superficiais, é possível verificar que, para a humidade relativa interior fixada no exemplo 2 (55% nos locais 2,3 e 4 e 60% no local 5) e para a temperatura exterior no momento da análise experimental (aproximadamente 10°C), os valores do coeficiente variam entre os 1,23 W/m<sup>2</sup>.°C, 2,16 W/m<sup>2</sup>.°C, 1,76 W/m<sup>2</sup>.°C e 2,55 W/m<sup>2</sup>.°C para os locais 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Se as temperaturas obtidas experimentalmente fossem conseguidas no momento em que a temperatura exterior atinge os valores mínimos de 4°C em Janeiro e de 3°C em Fevereiro, então os valores seriam de 0,61 W/m<sup>2</sup>.°C, 1,29 W/m<sup>2</sup>.°C, 0,97 W/m<sup>2</sup>.°C e 1,82 W/m<sup>2</sup>.°C (para o momento de Janeiro) e de 0,56 W/m<sup>2</sup>.°C, 1,21 W/m<sup>2</sup>.°C, 0,90 W/m<sup>2</sup>.°C e 1,74 W/m<sup>2</sup>.°C (para o momento de Fevereiro).

Sabe-se que o coeficiente de transmissão térmica do Edifício X é de 0,48 W/m<sup>2</sup>.°C e do Edifício II é de 1,32 W/m<sup>2</sup>.°C. Estes edifícios correspondem aos locais 4 e 5, respectivamente. Para qualquer um dos três momentos indicados em cima, os edifícios têm um coeficiente de transmissão térmica menor que o máximo observado, ou seja, em qualquer dos locais é possível evitar que se atinjam valores de 80% da humidade relativa na superfície interior.

Este trabalho é complementar à Dissertação intitulada “Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL – análise numérica” realizada durante o mesmo período de tempo e com partilha dos dados da análise experimental.

## **5.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Como recomendação para outros trabalhos, sugere-se que seja feito um reconhecimento inicial das capacidades do software complementar da câmara termográfica. Este aspecto permite tirar mais fotos em menos tempo, sem haver preocupação de centrar os pontos que se querem analisar nem acertar correctamente a escala das temperaturas. Todo este processo é feito no software e possibilita a poupança de algum tempo, que é essencial porque no litoral de Portugal, como é o caso da FCT-UNL, existem poucos dias ideais para fazer esta análise. Além deste reconhecimento, também é importante que sejam medidas as humidades relativas interior e exterior na altura dos ensaios.

Por outro lado, seria interessante que se fizesse uma análise a diferentes tipos de ocupação (salas de aula, gabinetes, zonas comuns, auditórios, etc.) de um mesmo edifício. Para um coeficiente de transmissão térmica igual em toda a envolvente, é importante perceber quais as diferenças que diferentes tipos de ocupação podem ter na temperatura ambiente interior e quantificar as perdas de calor através da envolvente de cada compartimento.

Outra análise possível seria verificar como é que a envolvente do edifício arrefece/aquece ao longo do dia. Para isso é necessário que se faça uma observação de algumas horas, de preferência de noite ou de madrugada, para se poder comparar a evolução da temperatura ambiente interior e exterior, assim como as temperaturas superficiais interiores e exteriores para se analisar as pontes térmicas presentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comissão das Comunidades Europeias - *Plano de acção para a eficiência energética: Concretizar o potencial*. Comunicado da Comissão, Bruxelas, 2006.
- [2] Comunicado de imprensa, *Conferência ESCO Europe 2010*, ADENE, 2010.
- [3] ERHORN-KLUTTIG, H.; ERHORN, H. - *Impact of thermal bridges on the energy performance of buildings*. ASIEPI, Information Paper P148 of the EPBD Buildings Platform, 27/03/2009.
- [4] THOMSEN, K.; ROSE, J. - *Analysis of execution quality related to thermal bridges*. ASIEPI, Information Paper P159 of the EPBD Buildings Platform, 18/10/2009.
- [5] CORVACHO, Maria Helena - *Estudo das pontes térmicas na envolvente dos edifícios*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica, FEUP, 1987.
- [6] CORVACHO, Maria Helena - *Pontes térmicas – Análise do fenómeno e proposta de soluções*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, FEUP, 1996.
- [7] CORVACHO, Maria Helena - *Catálogo de pontes térmica*. Nota de Informação Técnica – NIT 003, LFC/FEUP, 1999.
- [8] ABREU, Maria Isabel - *Correcção de pontes térmicas em intervenções de reabilitação*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios, FEUP, 2003.
- [9] VALÉRIO, Jorge - *Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico e energético de edifícios residenciais correntes*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, IST, 2007.
- [10] VIEIRA, Nuno - *Humidade superficial crítica – Critérios de projecto para a envolvente dos edifícios portugueses*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios, FEUP, 2002.
- [11] SANTOS, Sara - *Análise do uso da energia na FCT-UNL (edifícios II, VII, VIII, IX e X) e estudo dos comportamentos relativos ao uso da energia*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente - Gestão e Sistemas Ambientais, FCT-UNL, 2010.

- [12] PIEDADE, Ana Canha et al. - *Climatização em edifícios – Envolvente e Comportamento térmico*. Edições ORION, Lisboa, Maio 2000.
- [13] MORET RODRIGUES, António et al - *Térmica de Edifícios*. Edições ORION, Lisboa, Março 2009.
- [14] HENRIQUES, Fernando – *Documentos de apoio à disciplina de Física das Construções*. FCT/UNL, 2009.
- [15] ADENE; Apresentação no Seminário “Keep cool in Zero Energy Buildings” - *Certificação energética em Portugal*. LNEG, 17 de Maio de 2010.
- [16] DECRETO-LEI nº 80/2006 - *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*.D.R. 1ª Série nº 67 (2006-04-04) pags. 2468-2513.
- [17] PEIXOTO DE FREITAS, Vasco - *Seleção exigencial de painéis prefabricados em betão da PréGaia para aplicação em fachadas*. Relatório HT 171/01, Porto, 2002.
- [18] SANTOS, C.A.; MATIAS, Luís -*Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios – ITE 50*.LNEC, Lisboa, 2006.
- [19] ROULET, Claude-Alain - *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. PPUR, Lausanne, 2004.
- [20] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 10211:2007 – *Thermal bridges in building constructions. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations*. Brussels, CEN, December 2007.
- [21] LARBI, A. Ben - *Statistical modeling of heat transfer for thermal bridges of buildings*. Energy and Buildings 37, pags. 945-951, 2005.
- [22] HENRIQUES, Fernando; AELENEI, Daniel – *Avaliação do risco de ocorrência de condensações nas fachadas dos edifícios: Uma abordagem preliminar*. PATORREB 2009, volume II, pags. 571 – 576, Porto, Março 2009.
- [23] HENRIQUES, Fernando - *Humidade em Paredes*. LNEC, Lisboa, 1994.
- [24] MENDONÇA, Luís - *Condensações em edifícios*. Engenharia & Vida, nº 63, pags. 71-74, Setembro 2005.

- [25] Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias (2003-04-01) pags. 65-71.
- [26] MALDONADO, Eduardo et al. - *CONCERTED ACTION – Supporting transposition and implementation of the Directive 2002/91/EC*, EPBD, February 2010.
- [27] DECRETO-LEI nº 78/2006 - *Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios*. D.R. 1ª Série nº 67 (2006-04-04) pags. 2411-2415.
- [28] Resolução do Conselho de Ministros - *Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética*. D.R. 1ª Série nº 97 (2008-05-20) pags. 2824-2865.
- [29] DECRETO-LEI nº 79/2006 - *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*. D.R. 1ª Série nº 67 (2006-04-04) pags. 2416-2468.
- [30] CITTERIO, Marco et al. - *Thermal bridges in the EPBD context: overview on MS approaches in regulations*. ASIEPI, Information Paper P64 of the EPBD Buildings Platform, 24/04/2008.
- [31] WOUTERS, P.; SCHIETECAT, J. - *Practical guide for the hygrothermal evaluation of thermal bridges*. SAVE KOPRACTICE, 2003.
- [32] TILMANS, A.; Van ORSHOVEN, D. - *Draft method for the consideration of thermal bridges in the EPB-regulation in Belgium: summary description*. ASIEPI, Belgian Building Research Institute, 2010.
- [33] Documento Básico HE – *Ahorro de energia* (HE 1 Limitación de demanda energética), Março 2006.
- [34] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 6946:2007 – *Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method*. Brussels, CEN, December 2007.
- [35] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 13788:2001 – *Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods*. Brussels, CEN, July 2001.



- [36] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) - EN ISO 14683:2007 – *Thermal bridges in building construction. Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values*. Brussels, CEN, December 2007.
- [37] MATOS, António - *Evolução do Campus da Caparica – Historial dos estudos de implantação e caracterização do terreno do campus e suas implicações para o SGA*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, FCT-UNL, 2009.
- [38] BARREIRA, Eva - *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção de Edifícios, FEUP, 2004.
- [39] MENDONÇA, Luís - *Termografia por infravermelhos – Inspeção de betão*. Engenharia & Vida, nº 16, pags. 53-57, Setembro 2005.
- [40] OCAÑA, Silvia et al. - *Thermographic survey of two rural buildings in Spain*. Energy and Buildings 36, pags. 515-523, 2004.
- [41] MANUEL, David - *Thermographie infrarouge. Diagnostique thermique du bâti. Rapport de stage*. CSTB, Setembro 1997.
- [42] CASTRO, Carlos - *Puentes térmicos en CTE HE1*. Aislamiento e Impermeabilización, pags. 31-34, COMGE EDITORIAL, 2009.
- [43] CASTRO, Carlos – *Puentes térmicos en edificación: solución com planchas de poliestireno extruido*. DOW, 2008.

**Outros sites da Internet consultados:**

[www.adene.pt](http://www.adene.pt)

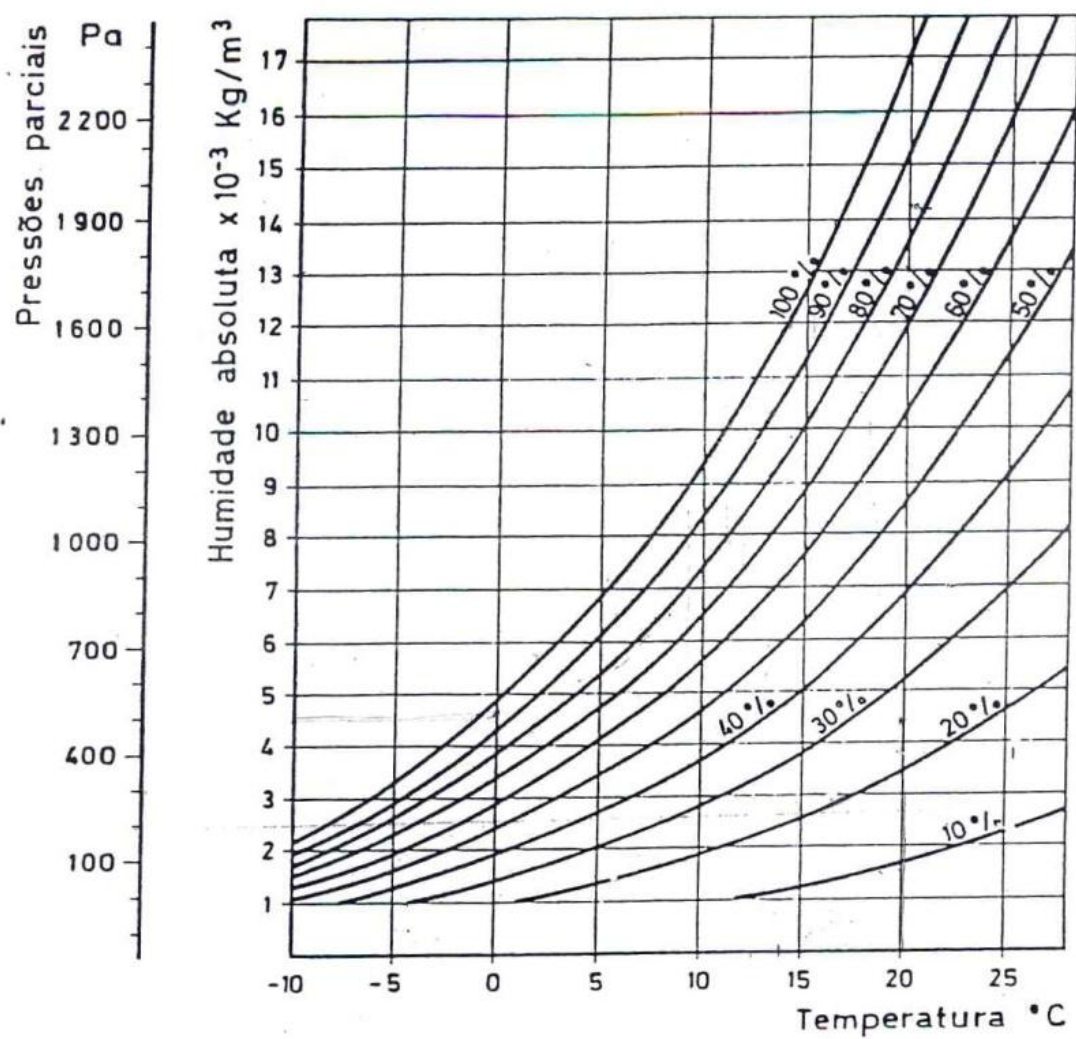
[www.fct.unl.pt](http://www.fct.unl.pt)

<http://science.howstuffworks.com/question651.htm>

[www.wunderground.com](http://www.wunderground.com)

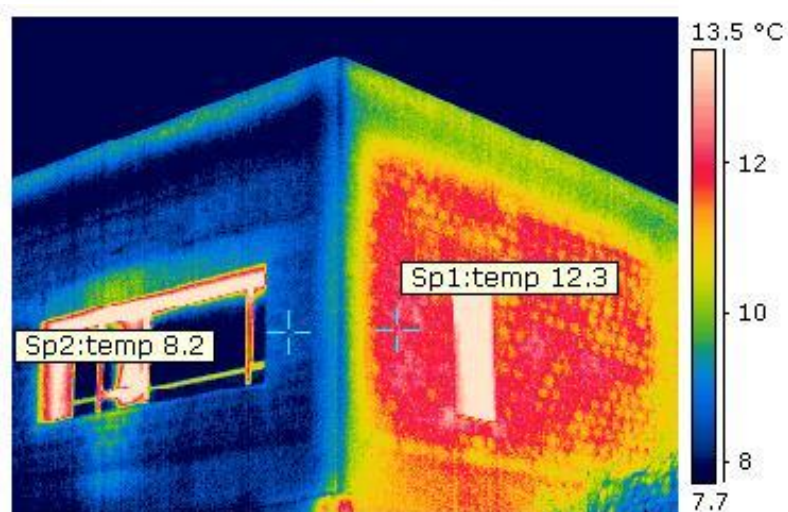
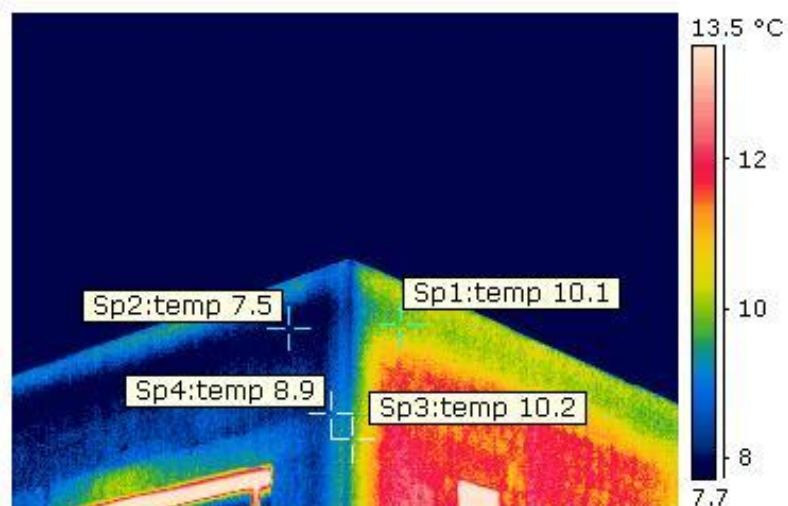
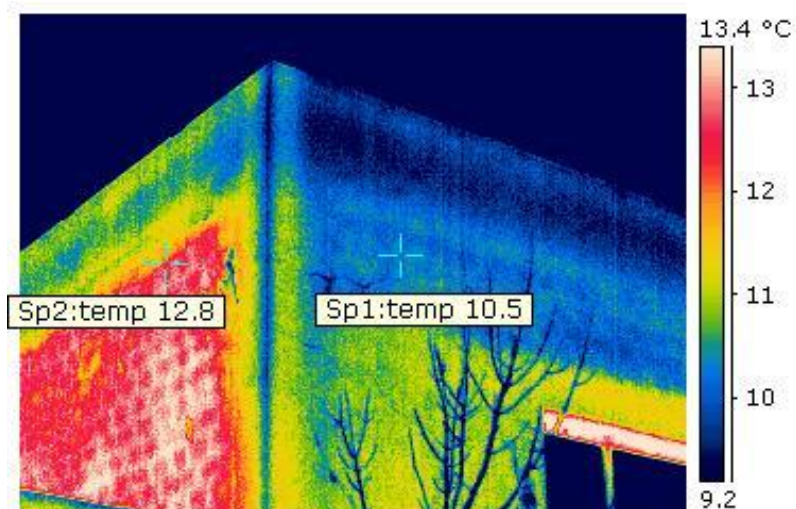
[www.wikipédia.com](http://www.wikipédia.com)

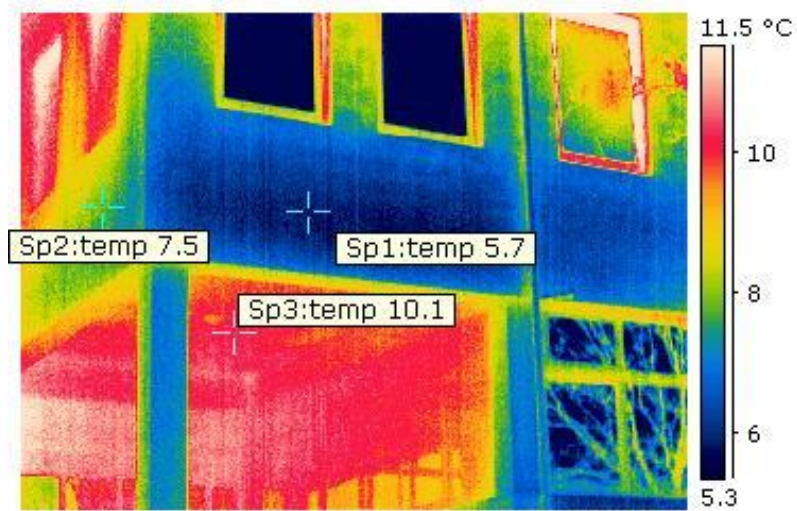
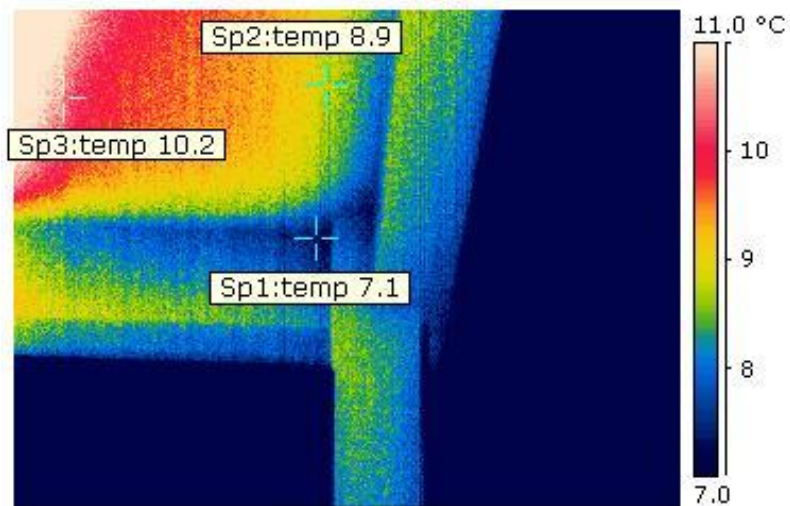
# ANEXO 1 – Diagrama Psicrométrico [23]



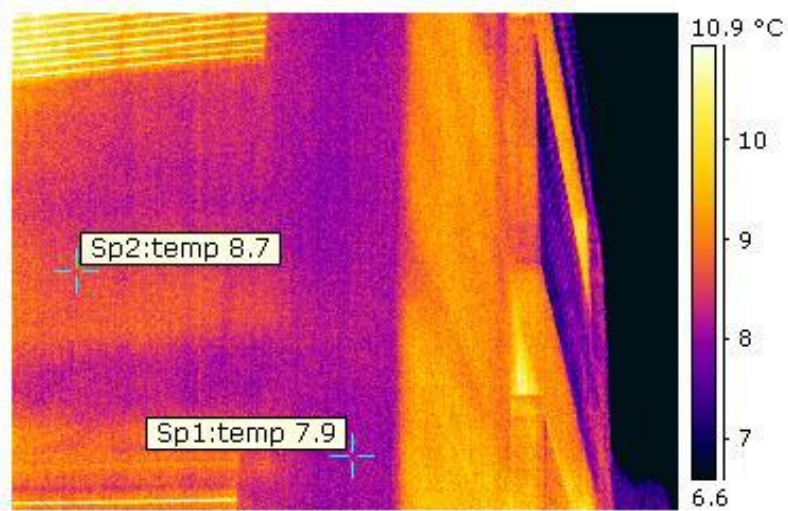
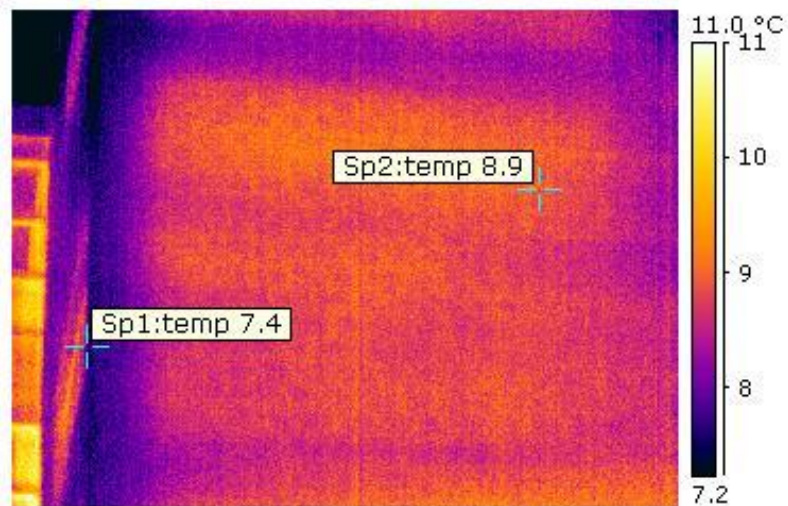


## ANEXO 2 – Restantes fotos não tratadas











### ANEXO 3 – Quadros para cálculo do $U_{\text{máx}}$

Local 3

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
18,9	11	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,00	3,99
18,9	10	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,12	3,54
18,9	9	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,20	3,18
18,9	8	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,28	2,89
18,9	7	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,34	2,65
18,9	6	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,39	2,44
18,9	5	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,43	2,26
18,9	4	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,47	2,11
18,9	3	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,50	1,98
18,9	2	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,53	1,86
18,9	1	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,56	1,76
18,9	0	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,58	1,67

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
18,9	11	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,21	3,18
18,9	10	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,29	2,82
18,9	9	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,37	2,54
18,9	8	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,42	2,30
18,9	7	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,47	2,11
18,9	6	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,51	1,95
18,9	5	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,55	1,81
18,9	4	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,58	1,68
18,9	3	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,61	1,58
18,9	2	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,63	1,49
18,9	1	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,65	1,40
18,9	0	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,67	1,33



$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
18,9	11	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,39	2,44
18,9	10	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,46	2,16
18,9	9	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,51	1,94
18,9	8	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,56	1,77
18,9	7	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,60	1,62
18,9	6	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,63	1,49
18,9	5	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,65	1,39
18,9	4	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,68	1,29
18,9	3	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,70	1,21
18,9	2	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,72	1,14
18,9	1	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,73	1,08
18,9	0	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,75	1,02

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
18,9	11	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,56	1,75
18,9	10	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,61	1,56
18,9	9	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,65	1,40
18,9	8	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,68	1,27
18,9	7	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,71	1,16
18,9	6	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,73	1,07
18,9	5	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,75	1,00
18,9	4	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,77	0,93
18,9	3	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,78	0,87
18,9	2	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,79	0,82
18,9	1	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,81	0,77
18,9	0	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,82	0,73

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
18,9	11	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,72	1,12
18,9	10	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,75	0,99
18,9	9	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,78	0,89
18,9	8	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,80	0,81
18,9	7	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,81	0,74
18,9	6	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,83	0,69
18,9	5	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,84	0,64
18,9	4	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,85	0,59
18,9	3	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,86	0,56
18,9	2	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,87	0,52
18,9	1	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,88	0,49
18,9	0	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,88	0,47

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
18,9	11	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,87	0,53
18,9	10	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,88	0,47
18,9	9	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,90	0,42
18,9	8	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,90	0,38
18,9	7	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,91	0,35
18,9	6	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,92	0,32
18,9	5	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,93	0,30
18,9	4	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,93	0,28
18,9	3	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,93	0,26
18,9	2	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,94	0,25
18,9	1	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,94	0,23
18,9	0	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,95	0,22

#### Local 4

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
17,3	11	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,00	3,98
17,3	10	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,14	3,44
17,3	9	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,24	3,02
17,3	8	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,33	2,70
17,3	7	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,39	2,44
17,3	6	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,45	2,22
17,3	5	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,49	2,04
17,3	4	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,53	1,89
17,3	3	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,56	1,75
17,3	2	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,59	1,64
17,3	1	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,62	1,54
17,3	0	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,64	1,45

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
17,3	11	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,26	2,97
17,3	10	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,36	2,56
17,3	9	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,44	2,25
17,3	8	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,50	2,01
17,3	7	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,55	1,82
17,3	6	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,59	1,65
17,3	5	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,62	1,52
17,3	4	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,65	1,41
17,3	3	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,67	1,31
17,3	2	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,69	1,22
17,3	1	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,71	1,15
17,3	0	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,73	1,08

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
17,3	11	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,49	2,04
17,3	10	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,56	1,76
17,3	9	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,61	1,55
17,3	8	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,65	1,38
17,3	7	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,69	1,25
17,3	6	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,72	1,14
17,3	5	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,74	1,05
17,3	4	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,76	0,97
17,3	3	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,78	0,90
17,3	2	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,79	0,84
17,3	1	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,80	0,79
17,3	0	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,81	0,74

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
17,3	11	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,70	1,18
17,3	10	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,74	1,02
17,3	9	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,78	0,90
17,3	8	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,80	0,80
17,3	7	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,82	0,72
17,3	6	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,83	0,66
17,3	5	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,85	0,61
17,3	4	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,86	0,56
17,3	3	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,87	0,52
17,3	2	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,88	0,49
17,3	1	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,89	0,46
17,3	0	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,89	0,43

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{\text{sat}, \phi_{\text{si}}}$ (Pa)	$\theta_{\text{si}, \text{min}}$ (°C)	$f_{\text{Rsi}, \text{min}}$	$U_{\text{máx}}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
17,3	11	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,90	0,39
17,3	10	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,92	0,33
17,3	9	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,93	0,29
17,3	8	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,93	0,26
17,3	7	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,94	0,24
17,3	6	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,95	0,22
17,3	5	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,95	0,20
17,3	4	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,95	0,18
17,3	3	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,96	0,17
17,3	2	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,96	0,16
17,3	1	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,96	0,15
17,3	0	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,96	0,14

Local 5

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
25	11	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,00	3,99
25	10	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,07	3,73
25	9	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,13	3,49
25	8	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,18	3,29
25	7	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,22	3,10
25	6	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,26	2,94
25	5	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,30	2,79
25	4	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,33	2,66
25	3	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,36	2,54
25	2	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,39	2,43
25	1	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,42	2,33
25	0	0,45	1051,65	1314,56	11,03	0,44	2,24

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
25	11	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,12	3,54
25	10	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,17	3,30
25	9	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,23	3,09
25	8	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,27	2,91
25	7	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,31	2,75
25	6	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,35	2,61
25	5	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,38	2,48
25	4	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,41	2,36
25	3	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,44	2,25
25	2	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,46	2,15
25	1	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,48	2,06
25	0	0,5	1168,50	1460,63	12,62	0,50	1,98

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
25	11	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,22	3,12
25	10	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,27	2,91
25	9	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,32	2,73
25	8	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,36	2,57
25	7	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,39	2,43
25	6	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,43	2,30
25	5	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,45	2,18
25	4	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,48	2,08
25	3	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,50	1,98
25	2	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,53	1,90
25	1	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,55	1,82
25	0	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,56	1,75

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
25	11	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,32	2,73
25	10	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,36	2,55
25	9	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,40	2,39
25	8	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,44	2,25
25	7	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,47	2,13
25	6	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,50	2,01
25	5	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,52	1,91
25	4	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,54	1,82
25	3	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,57	1,74
25	2	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,58	1,66
25	1	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,60	1,59
25	0	0,6	1402,20	1752,75	15,44	0,62	1,53

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
25	11	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,41	2,37
25	10	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,45	2,22
25	9	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,48	2,08
25	8	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,51	1,96
25	7	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,54	1,85
25	6	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,56	1,75
25	5	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,58	1,66
25	4	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,60	1,58
25	3	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,62	1,51
25	2	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,64	1,45
25	1	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,65	1,39
25	0	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,67	1,33

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
25	11	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,49	2,04
25	10	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,52	1,90
25	9	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,55	1,78
25	8	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,58	1,68
25	7	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,60	1,59
25	6	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,62	1,50
25	5	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,64	1,43
25	4	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,66	1,36
25	3	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,68	1,30
25	2	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,69	1,24
25	1	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,70	1,19
25	0	0,7	1635,90	2044,88	17,86	0,71	1,14

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_i}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
25	11	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,57	1,73
25	10	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,60	1,61
25	9	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,62	1,51
25	8	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,64	1,42
25	7	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,66	1,34
25	6	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,68	1,27
25	5	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,70	1,21
25	4	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,71	1,15
25	3	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,73	1,10
25	2	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,74	1,05
25	1	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,75	1,01
25	0	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,76	0,97

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_i}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
25	11	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,64	1,43
25	10	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,67	1,33
25	9	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,69	1,25
25	8	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,71	1,18
25	7	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,72	1,11
25	6	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,74	1,05
25	5	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,75	1,00
25	4	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,76	0,95
25	3	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,77	0,91
25	2	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,78	0,87
25	1	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,79	0,83
25	0	0,8	1869,60	2337,00	20,00	0,80	0,80

#### Temperatura de conforto

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_i}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
20	11	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,18	3,28
20	10	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,26	2,95
20	9	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,33	2,68
20	8	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,39	2,46
20	7	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,43	2,27
20	6	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,47	2,11
20	5	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,51	1,97
20	4	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,54	1,84
20	3	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,57	1,74
20	2	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,59	1,64
20	1	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,61	1,55
20	0	0,5	1168,5	1460,63	12,62	0,63	1,48

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
20	11	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,34	2,63
20	10	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,41	2,37
20	9	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,46	2,15
20	8	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,51	1,97
20	7	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,55	1,82
20	6	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,58	1,69
20	5	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,61	1,58
20	4	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,63	1,48
20	3	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,65	1,39
20	2	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,67	1,31
20	1	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,69	1,25
20	0	0,55	1285,35	1606,69	14,09	0,70	1,18

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
20	11	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,49	2,03
20	10	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,54	1,83
20	9	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,59	1,66
20	8	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,62	1,52
20	7	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,65	1,40
20	6	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,67	1,30
20	5	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,70	1,22
20	4	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,71	1,14
20	3	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,73	1,07
20	2	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,75	1,01
20	1	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,76	0,96
20	0	0,6	1402,2	1752,75	15,44	0,77	0,91

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi_{si}}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> .°C))
20	11	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,63	1,47
20	10	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,67	1,32
20	9	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,70	1,20
20	8	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,72	1,10
20	7	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,75	1,02
20	6	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,76	0,95
20	5	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,78	0,88
20	4	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,79	0,83
20	3	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,81	0,78
20	2	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,82	0,74
20	1	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,83	0,70
20	0	0,65	1519,05	1898,81	16,69	0,83	0,66

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi si}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
20	11	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,76	0,95
20	10	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,79	0,86
20	9	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,81	0,78
20	8	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,82	0,71
20	7	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,84	0,66
20	6	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,85	0,61
20	5	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,86	0,57
20	4	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,87	0,53
20	3	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,87	0,50
20	2	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,88	0,48
20	1	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,89	0,45
20	0	0,7	1635,9	2044,88	17,86	0,89	0,43

$\theta_i$ (°C)	$\theta_e$ (°C)	$\phi_i$	$p_i$ (Pa)	$p_{sat, \phi si}$ (Pa)	$\theta_{si, min}$ (°C)	$f_{Rsi, min}$	$U_{m\acute{a}x}$ (W/(m <sup>2</sup> ·°C))
20	11	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,88	0,46
20	10	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,90	0,42
20	9	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,91	0,38
20	8	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,91	0,35
20	7	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,92	0,32
20	6	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,93	0,30
20	5	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,93	0,28
20	4	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,94	0,26
20	3	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,94	0,24
20	2	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,94	0,23
20	1	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,95	0,22
20	0	0,75	1752,75	2190,94	18,96	0,95	0,21